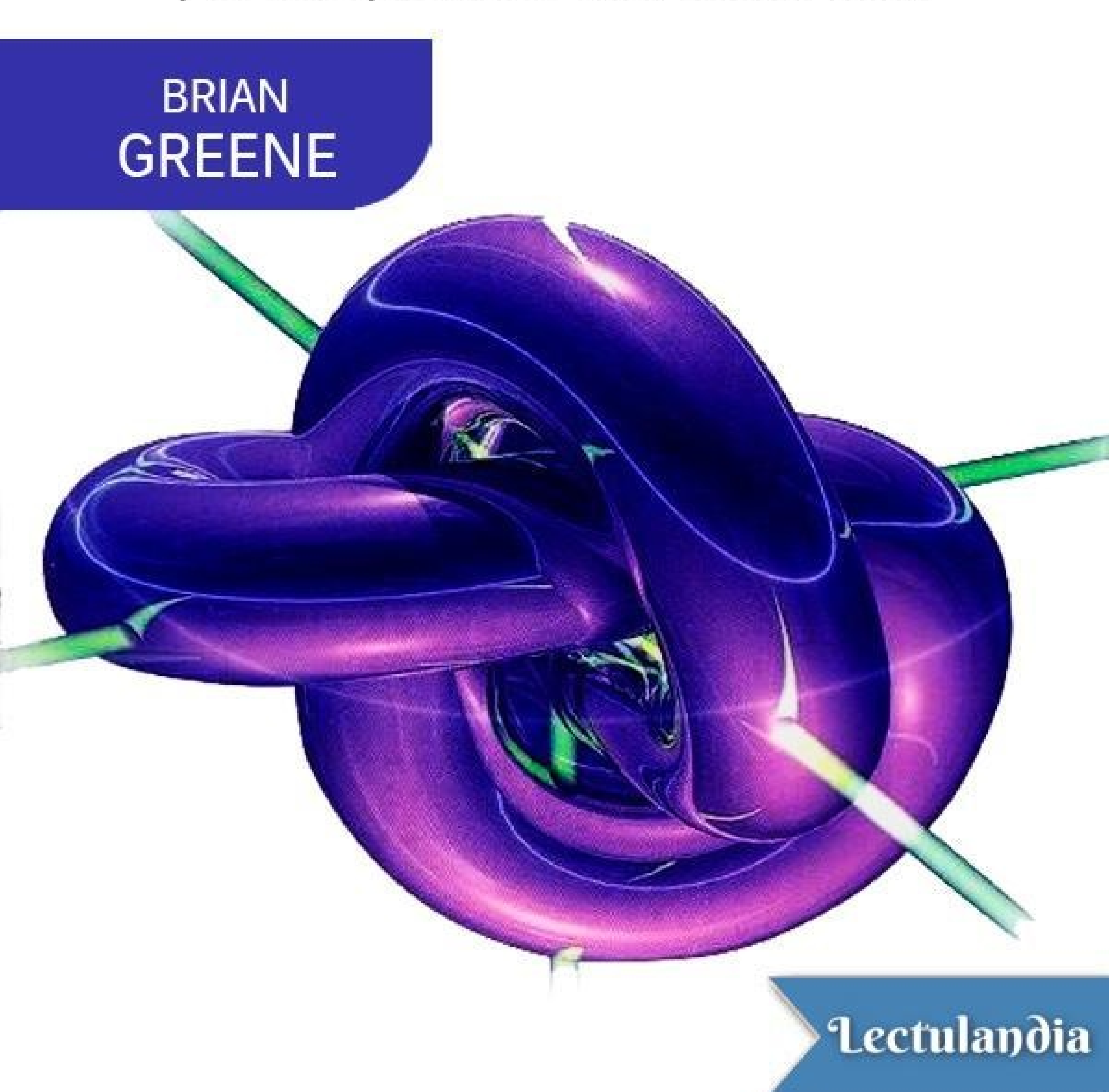
EL UNIVERSO ELEGANTE

Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final

BRIAN GREENE



Brian Greene explica en este libro cómo las grandes teorías de la relatividad y de la mecánica cuántica, que transformaron nuestra interpretación de la naturaleza durante el siglo XX, nos han conducido al mayor problema de la física de hoy en día: la búsqueda de una ley que unifique a todas las demás, una ley que Einstein persiguió en vano durante treinta años y a la que se denomina *teoría de supercuerdas*. Esta teoría vendría a unificar esos dos grandes pilares de la física actual, el cuántico y el gravitacional, al suponer que todo lo que sucede en el universo surge de las vibraciones de una única entidad: microscópicos lazos de energía que se encuentran en el auténtico núcleo de la materia y que habitan en espacios de dimensiones superiores a las cuatro del espacio-tiempo einsteniano.

Con maestría y claridad, Greene nos ofrece en *El universo elegante* la aportación más brillante que se ha escrito hasta ahora para hacer accesible al gran público este último misterio de la naturaleza que nos explicaría, finalmente, todo. Como ha dicho Michio Kaku, «Greene ha hecho un trabajo soberbio al presentarnos cuestiones complejas de una forma no sólo amena, sino intrigante. Recomiendo la lectura de este libro a cualquiera que alguna vez se haya preguntado, como hizo Einstein, si Dios creó el universo jugando a los dados».

Brian Greene es en la actualidad profesor de física y de matemática en la Universidad de Columbia. Ampliamente reconocido por su serie de descubrimientos sobre la teoría de supercuerdas, ha colaborado como investigador en más de una veintena de países. Su último libro es *El tejido del cosmos*.

Brian Greene

El universo elegante

ePUB v1.3
Perseo 27.05.12

Título original: *The Elegant Universe*
Brian Greene, 1999
Traducción: Mercedes García Garmilla
Diseño/retoque portada: Perseo, basada en una original

Editor original: Perseo (v1.0 a v1.3)
Corrección de erratas: Reagal
ePub base v2.0

A mi madre y a la memoria de mi padre *con amor*
y gratitud

Prólogo

Durante los últimos treinta años de su vida, Albert Einstein buscó incesantemente lo que se llamaría una teoría unificada de campos, es decir, una teoría capaz de describir las fuerzas de la naturaleza dentro de un marco único, coherente y que lo abarcase todo. Einstein no estaba motivado por las cosas que a menudo relacionamos con la actividad científica, como, por ejemplo, intentar hallar una explicación para estos o aquellos datos experimentales. Lo que le impulsaba era una creencia apasionada en la idea de que una comprensión más profunda del universo pondría de manifiesto la auténtica maravilla: la sencillez y el enorme poder de los principios en los que se basa. Einstein deseaba explicar el funcionamiento del universo con una claridad nunca antes conseguida, lo que nos permitiría a todos nosotros contemplar con asombro y admiración su belleza y elegancia absolutas.

Einstein nunca consiguió hacer realidad su sueño, en gran medida porque ciertas limitaciones le cerraban el camino: en sus días, una cantidad de características esenciales de la materia y de las fuerzas de la naturaleza eran o bien desconocidas, o, en el mejor de los casos, poco comprendidas. Pero durante el último medio siglo, en cada nueva generación ha habido físicos que —a veces a trompicones y, otras veces, desviándose hacia callejones sin salida— han estado trabajando sin cesar sobre los descubrimientos de sus predecesores para hacer encajar todas las piezas de un modelo más completo con el que entender el funcionamiento del universo. Y, actualmente, mucho después de que Einstein planteara su búsqueda de una teoría unificada y acabara con las manos vacías, los físicos creen que han hallado por fin un marco en el que se pueden encajar esos temas, en un sistema completo y sin costuras: una teoría única que, en principio, es capaz de describir todos los fenómenos físicos. Esta teoría, la teoría de las supercuerdas, es el tema de este libro.

También espero que *El universo elegante* sea interesante para lectores que tengan alguna formación científica. Para estudiantes de ciencia y para profesores, espero que este libro cristalice algunos de los fundamentos de la física moderna, tales como la relatividad especial, la relatividad general y la mecánica cuántica, transmitiendo al mismo tiempo el contagioso entusiasmo de los investigadores que se aproximan a la largamente buscada teoría unificada. Para el ávido lector de divulgación científica, he

tratado de explicar algunos de los regocijantes avances en nuestro entendimiento del cosmos que han visto la luz durante la última década. Y para mis colegas en otras disciplinas científicas, espero que este libro les dé un honesto y balanceado sentido de por qué los teoricistas de cadenas están tan entusiasmados con el progreso que se hace en la búsqueda de la teoría fundamental de la naturaleza.

La teoría de las supercuerdas genera una amplia red de recursos. Se trata de un tema amplio y profundo que inspira muchos de los descubrimientos cruciales de la física. Dado que esta teoría unifica las leyes de lo grande y de lo pequeño, es decir, las leyes que gobiernan la física cuando nos trasladamos hasta los rincones más lejanos del cosmos y cuando descendemos hasta la partícula más diminuta de la materia, existen muchos caminos para aproximarse a este tema. He optado por centrarme en la evolución de nuestro modo de comprender el espacio y el tiempo. Creo que ésta es una vía especialmente atractiva para desarrollar el tema, ya que realiza un corte rico y fascinante a través de las teorías nuevas y esenciales. Einstein mostró al mundo que el espacio y el tiempo se comportan de maneras asombrosamente poco corrientes. Actualmente, la investigación más avanzada ha integrado sus descubrimientos en un universo cuántico que posee numerosas dimensiones ocultas entrelazadas en el tejido del cosmos —dimensiones cuya geometría profusamente entrelazada tiene muchas probabilidades de contener la clave de algunas de las cuestiones más difíciles que se han planteado jamás—. Aunque algunos de estos conceptos son bastante sutiles, veremos que es posible captarlos mediante analogías con cuestiones muy cercanas.

Además, una vez que estos conceptos se comprenden, aportan una sorprendente y revolucionaria perspectiva del universo.

A lo largo de este libro, he tratado de mantenerme en el rigor científico, ofreciendo al mismo tiempo al lector una visión intuitiva —a menudo utilizando la analogía y la metáfora— de cómo los científicos han conseguido alcanzar la concepción actual del cosmos. Aunque evito el lenguaje técnico y las fórmulas, sin embargo, dado que los conceptos que se tratan son radicalmente nuevos, puede que el lector necesite detenerse aquí y allá, reflexionar detenidamente sobre algún capítulo o meditar sobre alguna explicación, para lograr seguir plenamente la progresión de ideas. En la Cuarta Parte (relativa a los avances más recientes) hay unas pocas secciones que son ligeramente más abstractas que el resto; he tenido cuidado de prevenir al lector con antelación sobre el carácter de estas secciones y de estructurar el texto de tal forma que se puedan leer superficialmente o puedan saltarse, produciendo un impacto mínimo en la secuencia lógica del libro. He incluido un glosario de términos científicos para que se puedan recordar de manera fácil y accesible los conceptos que aparecen en el texto principal. Aunque un lector más informal pueda desear saltarse la totalidad de las notas finales, el lector más diligente

encontrará en estas notas la posibilidad de ampliar algunas observaciones incluidas en el texto y de aclarar conceptos que en el mismo se han simplificado. También se ofrecen en el glosario unas pocas digresiones técnicas para aquellos que posean una formación matemática.

Debo dar las gracias a muchas personas por la ayuda prestada durante la realización de este libro. David Steinhardt leyó el manuscrito con gran minuciosidad y aportó generosamente agudas opiniones sobre la edición, además de darme ánimo, lo cual tiene un valor incalculable. David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicholas Boles, Steven Carlip, Arthur Greenspoon, David Mermin, Michael Popowits y Shani Offen leyeron el manuscrito detenidamente y me ofrecieron opiniones y sugerencias detalladas que realzaban enormemente la presentación. Otros que leyeron la totalidad o parte del manuscrito y me ofrecieron consejo y ánimos son Paul Aspinwall, Persis Drell, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Greene, Teddy Jefferson, Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwen, Nari Mistry, Hasan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa y Gabriele Veneziano. Estoy especialmente agradecido a Raphael Gunner por, entre otras muchas cosas, sus perspicaces comentarios en una fase inicial de la redacción de este libro, los cuales me ayudaron a configurar la forma general del mismo, y a Robert Malley por sus amables y persistentes ánimos para que fuera más allá de reflexionar sobre el tema y me pusiera «manos a la obra». Steven Weinberg y Sydney Coleman me ofrecieron valiosos consejos y ayuda. Además, es un placer reconocer las numerosas ayudas recíprocas que se produjeron en la cooperación con Carol Archer, Vicky Carstens, David Cassel, Anne Coyle, Michael Duncan, Jane Forman, Wendy Greene, Susan Greene, Eric Jendresen, Gary Kass, Shiva Kumar, Robert Mawhinney, Pam Morehouse, Pierre Ramond, Amanda Salles y Eero Simoncelli. Estoy en deuda con Costas Efrhimiou por su ayuda en la investigación y en el hallazgo de referencias, así como por convertir mis croquis iniciales en dibujos lineales a partir de los cuales Tom Rockwell creó —con la paciencia de un santo y una visión artística magistral— las figuras que ilustran este texto. También doy las gracias a Andrew Hanson y Jim Sethna por su ayuda en la preparación de unas cuantas figuras especializadas.

Por acceder a ser entrevistados y prestarme sus puntos de vista personales sobre varios de los temas tratados, doy las gracias a Howard Georgi, Sheldon Glashow, Michael Green, John Schwarz, John Wheeler, Edward Witten, y, de nuevo, a Andrew Strominger, Cumrun Vafa y Gabriele VeneZiano.

Tengo el placer de agradecer las agudas opiniones y sugerencias de valor incalculable de Angela Von der Lippe y la aguda sensibilidad para los detalles de Traci Nagle, mis editores de W. W. Norton, los cuales dieron un significativo realce a

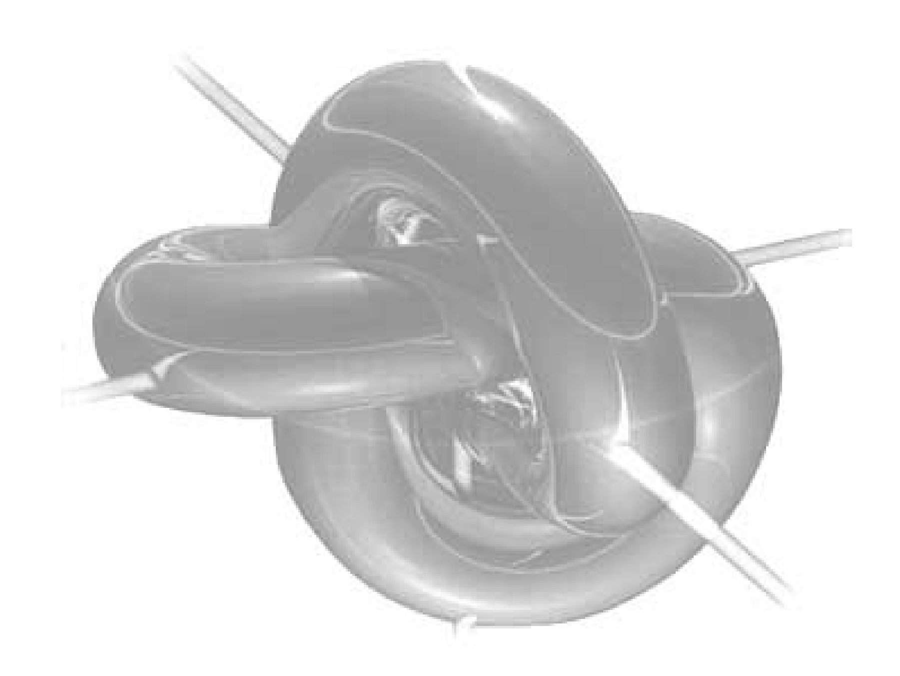
la claridad de la presentación. También doy las gracias a mis agentes literarios, John Brockman y Katinka Matson, por sus expertos consejos en el cuidado del libro desde el principio de su elaboración hasta su publicación.

Por apoyar generosamente mis investigaciones en física teórica durante más de una década y media, quiero expresar toda mi gratitud a la National Science Foundation, la Alfred P. Sloan Foundation y el Departamento Estadounidense de la Energía. Quizá no resulte sorprendente que mis propias investigaciones se hayan centrado en el impacto que la teoría de las supercuerdas ha producido en nuestra concepción del espacio y el tiempo. En un par de capítulos al final del libro, explico algunos de los descubrimientos en los que he tenido la suerte de ser partícipe. Aunque espero que el lector disfrute leyendo estas explicaciones «internas», soy consciente de que pueden dar una impresión exagerada del papel que he desempeñado en el desarrollo de la teoría de las supercuerdas. Por este motivo, permítaseme aprovechar esta oportunidad para expresar mi agradecimiento a los más de un millar de físicos de todo el mundo que han participado de forma crucial y con enorme dedicación en el esfuerzo por configurar la teoría definitiva del universo. Pido disculpas a todos aquellos cuya obra no está incluida en esta relación; esto no es más que un reflejo de la perspectiva temática que he elegido y de las limitaciones de espacio de una presentación general.

Finalmente, mi sincero agradecimiento a Ellen Archer por su inquebrantable amor y su ayuda, sin los cuales este libro nunca se habría escrito.

Parte I

Los límites del conocimiento



Capítulo 1

Atado con cuerdas

Hablar de una ocultación sería quizá demasiado drástico, pero, durante más de medio siglo —incluso en el preciso momento de alcanzar algunos de los mayores logros científicos de la historia— los físicos han sido conscientes con toda tranquilidad de la existencia de una oscura nube que surgía amenazadora en un horizonte lejano. El problema es el siguiente: existen dos pilares fundamentales en los que se apoya la física moderna. Uno es la relatividad general de Albert Einstein, que proporciona un marco teórico para la comprensión del universo a una escala máxima: estrellas, galaxias, cúmulos (o clusters) de galaxias, y aún más allá, hasta la inmensa expansión del propio universo. El otro pilar es la mecánica cuántica, que ofrece un marco teórico para la comprensión del universo a escalas mínimas: moléculas, átomos, y así hasta las partículas subatómicas, como los electrones y los quarks. A lo largo de años de investigación, los físicos han confirmado experimentalmente, con una exactitud casi inimaginable, la práctica totalidad de las predicciones que hace cada una de estas teorías. Sin embargo, estos mismos instrumentos teóricos conducen a otra conclusión inquietante: tal como se formulan actualmente, la relatividad general y la mecánica cuántica no pueden ser ambas ciertas a la vez. Las dos teorías en las que se basan los enormes avances realizados por la física durante los últimos cien años —unos avances que han explicado la expansión de los cielos y la estructura fundamental de la materia— son mutuamente incompatibles.

Si usted nunca ha oído previamente hablar de este feroz antagonismo, puede estar preguntándose por qué se produce. No es difícil encontrar la respuesta. Salvo en algunos casos muy especiales, los físicos estudian cosas que son o bien pequeñas y ligeras (como los átomos y sus partes constituyentes), o cosas que son enormes y pesadas (como las estrellas y las galaxias), pero no ambas a la vez. Esto significa que sólo necesitan utilizar la mecánica cuántica, o sólo la relatividad general, y pueden minimizar, con una mirada furtiva, la vociferante advertencia que les lanza la teoría que no están utilizando. Durante cincuenta años este planteamiento no ha sido tan feliz como la ignorancia, pero ha estado muy cerca de serlo.

No obstante, el universo puede ser un caso extremo. En las profundidades

centrales de un agujero negro se aplasta una enorme masa hasta reducirse a un tamaño minúsculo. En el momento del big bang, la totalidad del universo salió en erupción de una pepita microscópica cuyo tamaño hace que un grano de arena parezca gigantesco. Estos contextos son diminutos y, sin embargo, tienen una masa increíblemente grande, por lo que necesitan basarse tanto en la mecánica cuántica como en la relatividad general. Por ciertas razones que se irán aclarando cada vez más a medida que avancemos, las fórmulas de la relatividad general y las de la mecánica cuántica, cuando se combinan, empiezan a agitarse, a traquetear y a tener escapes de vapor como un automóvil viejo. Por decirlo menos figurativamente, hay en la física preguntas bien planteadas que ocasionan respuestas sin sentido a partir de la desafortunada amalgama de las dos teorías. Aunque se desee mantener el profundo interior de un agujero negro y el surgimiento inicial del universo envueltos en el misterio, no se puede evitar sentir que la hostilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general está clamando por un nivel más profundo de comprensión. ¿Puede ser realmente que el universo en su nivel más importante esté dividido, requiriendo un conjunto de leyes cuando las cosas son grandes, y otro conjunto diferente e incompatible cuando son pequeñas?

La teoría de las supercuerdas, una advenediza en comparación con los venerables edificios de la mecánica cuántica y la relatividad general, responde con un rotundo no. Una intensa investigación llevada a cabo durante la última década por físicos y matemáticos de todo el mundo ha revelado que este nuevo planteamiento, encaminado a explicar la materia en su nivel más básico, resuelve la tensión existente entre la relatividad general y la mecánica cuántica. De hecho, la teoría de las supercuerdas muestra aún más: dentro de este nuevo marco, la relatividad general y la mecánica cuántica se necesitan la una a la otra para que esta teoría tenga sentido. Según la teoría de las supercuerdas, el matrimonio entre las leyes de lo grande y las de lo pequeño no sólo es feliz, sino inevitable.

Esto es sólo una parte de las buenas noticias: porque, además, la teoría de las supercuerdas —abreviadamente, teoría de cuerdas— hace que esta unión avance dando un paso de gigante. Durante tres décadas, Einstein estuvo buscando una teoría unificada de la física, una teoría que entretejiera todas las fuerzas y todos los constituyentes materiales de la naturaleza dentro de un único tapiz teórico. Einstein no lo consiguió. Ahora, iniciado el nuevo milenio, los partidarios de la teoría de cuerdas anuncian que finalmente han salido a la luz los hilos de este escurridizo tapiz unificado. La teoría de cuerdas posee el potencial de mostrar que todos los sorprendentes sucesos que se producen en el universo —desde la frenética danza de esas partículas subatómicas llamadas quarks, hasta el majestuoso vals de las estrellas binarias en sus órbitas; desde la bola de fuego inicial del big bang, hasta los elegantes remolinos de las galaxias celestes— son reflejos de un gran principio físico, de una

ecuación magistral.

Dado que estas características de la teoría de cuerdas exigen que cambiemos drásticamente nuestra manera de entender el espacio, el tiempo y la materia, llevará cierto tiempo que nos adaptemos a ella hasta instalarnos en un nivel en el que resulte cómodo manejarla. No obstante, como se verá más adelante, vista en su propio contexto, la teoría de cuerdas emerge como un producto impresionante, pero natural, a partir de los descubrimientos revolucionarios que ha realizado la física durante los últimos cien años. De hecho, veremos que el conflicto existente entre la relatividad general y la mecánica cuántica no es realmente el primero, sino el tercero en una serie de conflictos decisivos con los que se tuvieron que enfrentar los científicos durante el siglo pasado, y que se han resuelto como consecuencia de una revisión radical de nuestro modo de comprender el universo.

Los tres conflictos

El primero de estos conflictos, que ya se había detectado nada menos que a finales del siglo XIX, se refiere a las desconcertantes propiedades del movimiento de la luz. Dicho resumidamente, según las leyes del movimiento de Isaac Newton, si alguien pudiera correr a una velocidad suficientemente rápida podría emparejarse con un rayo de luz que se esté emitiendo, mientras que, según las leyes del electromagnetismo de James Clerk Maxwell, esto es imposible. Como veremos en el capítulo 2, Einstein resolvió este conflicto mediante su teoría de la relatividad especial y así le dio un vuelco completo a nuestro modo de entender el espacio y el tiempo. Según la relatividad especial, ya no se puede considerar al espacio y al tiempo como conceptos universales grabados en piedra y percibidos de forma idéntica por todos los individuos. El espacio y el tiempo surgieron, a partir de la reelaboración llevada a cabo por Einstein, como estructuras maleables cuya forma y modo de presentarse dependen del estado de movimiento del observador.

El desarrollo de la relatividad especial creó inmediatamente el escenario para el segundo conflicto. Una de las conclusiones del trabajo de Einstein es que ningún objeto —de hecho, ninguna influencia o perturbación de ninguna clase— puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Sin embargo, como comentaremos en el capítulo 3, la teoría universal de la gravedad de Newton, que experimentalmente funciona tan bien y es tan grata para la intuición, habla de influencias que se transmiten en el espacio a grandes distancias instantáneamente. De nuevo fue Einstein quien intervino en el conflicto y lo resolvió ofreciendo un nuevo concepto de

la gravedad en su teoría general de la relatividad de 1915. Del mismo modo que la relatividad especial trastocó los conceptos previos de espacio y tiempo, lo hizo la relatividad general. No es sólo que el espacio y el tiempo estén influidos por el estado de movimiento del observador, sino que, además, pueden alabearse y curvarse en respuesta a la presencia de materia o energía. Tales distorsiones en la estructura del espacio y el tiempo, como veremos más adelante, transmiten la fuerza de la gravedad de un lugar a otro. Por consiguiente, no se puede ya pensar que el espacio y el tiempo sean un telón de fondo inerte en el que se desarrollan los sucesos del universo; al contrario, según la relatividad especial y la relatividad general, son actores que desempeñan un papel íntimamente ligado al desarrollo de dichos sucesos.

Una vez más el modelo se repite: el descubrimiento de la relatividad general, aunque resuelve un conflicto, nos lleva a otro. A lo largo de tres décadas a partir de 1900, los físicos desarrollaron la mecánica cuántica (que se discute en el capítulo 4) en respuesta a varios problemas evidentes que se pusieron de manifiesto cuando los conceptos de la física del siglo XIX se aplicaron al mundo microscópico. Como hemos mencionado anteriormente, el tercer conflicto, el más trascendental, surge de la incompatibilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general. Como veremos en el capítulo 5, la forma geométrica ligeramente curvada del espacio, que aparece a partir de la relatividad general, es incompatible con el comportamiento microscópico irritante y frenético del universo que se deduce de la mecánica cuántica. Dado que hasta mediados de la década de 1980 no se presenta la solución que ofrecía la teoría de cuerdas, a dicho conflicto se le llama con toda razón el problema central de la física moderna. Además, la teoría de cuerdas, que se construye sobre la relatividad general y la relatividad especial, exige también una seria renovación de nuestros conceptos de espacio y tiempo. Por ejemplo, la mayoría de nosotros considera evidente que nuestro universo tenga tres dimensiones espaciales. Sin embargo, según la teoría de cuerdas esto no es así, ya que dicha teoría afirma que nuestro universo posee muchas más dimensiones que las que se perciben a simple vista —dimensiones que están arrolladas apretadamente dentro de la estructura plegada del cosmos—. Estas notables características de la naturaleza del espacio y el tiempo son tan esenciales que las utilizaremos como línea directriz en todo el libro de ahora en adelante. En realidad, la teoría de cuerdas es la historia del espacio y el tiempo desde Einstein.

Para valorar lo que es realmente la teoría de cuerdas, necesitamos retroceder un paso y describir brevemente lo que hemos aprendido durante el último siglo sobre la estructura microscópica del universo.

El universo en sus aspectos más pequeños: lo que sabemos sobre la materia

Los antiguos griegos suponían que la materia del universo estaba formada por diminutos componentes «indivisibles» que ellos llamaban *átomos*. Del mismo modo que el número de palabras posibles en un lenguaje alfabético está formado por el gran número de combinaciones de una pequeña cantidad de letras, los griegos intuyeron que la amplia variedad de objetos materiales podría también resultar de combinaciones hechas mediante un pequeño número de bloques elementales distintos. Fue una intuición presciente. Más de dos mil años después seguimos creyendo que esto es cierto, aunque la identidad de las unidades más fundamentales ha sido sometida a numerosas revisiones. En el siglo XIX, los científicos demostraron que muchas sustancias corrientes, como el oxígeno y el carbono, tenían un componente mínimo reconocible; siguiendo la tradición establecida por los griegos, lo llamaron *átomo*. El nombre permaneció, aunque la historia ha demostrado que era un nombre inapropiado, ya que los átomos son ciertamente «divisibles». A principios de la década de 1930, las obras colectivas de J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr y James Chadwick habían establecido la estructura del sistema solar como un modelo atómico que nos resulta conocido a la mayoría de nosotros. Lejos de ser el material constitutivo más elemental, los átomos están formados por un núcleo que contiene protones y neutrones, rodeado por un enjambre de electrones que describen órbitas alrededor de él.

Durante cierto tiempo muchos físicos pensaron que los protones, los neutrones y los electrones eran los «átomos» griegos. Pero, en 1968, los científicos que realizaban experimentos en el Stanford Linear Accelerator Center, valiéndose de una capacidad tecnológica cada vez mayor para comprobar las profundidades microscópicas de la materia, descubrieron que los protones y los neutrones no eran las partículas fundamentales. Demostraron que cada una de ellas estaba constituida por tres partículas menores, llamadas *quarks* —un nombre caprichoso que aparece en un pasaje de *Finnegan's Wake* de James Joyce y que fue adoptado por el físico teórico Murray Gell-Mann, quien previamente había intuido su existencia—. Los científicos que realizaron los experimentos confirmaron que los propios quarks existen en dos variedades, llamados, un poco menos creativamente, arriba *up* y abajo *down*. Un protón está formado por dos quarks arriba y un quark abajo; un neutrón está formado por dos quarks abajo y un quark arriba.

Todo lo que vemos en la tierra y en el cielo resulta estar hecho de combinaciones de electrones, quarks arriba y quarks abajo. Ninguna evidencia experimental indica que alguna de estas tres partículas esté constituida por algo menor. Pero muchas pruebas indican que el propio universo posee otras partículas adicionales. A mediados

de la década de 1950, Frederick Reines y Clyde Cowan encontraron pruebas experimentales concluyentes de la existencia de un cuarto tipo de partícula fundamental llamada *neutrino*, una partícula cuya existencia ya había predicho Wolfgang Pauli a principios de la década de 1930. Los neutrinos resultaron ser muy difíciles de encontrar porque son partículas fantasmas que rara vez interaccionan con otro tipo de materia: un neutrino dotado de una energía media puede atravesar fácilmente muchos miles de billones de kilómetros de plomo sin que en su movimiento se produzca el más leve efecto. Esto puede tranquilizarle, ya que, mientras usted está leyendo esto, miles de millones de neutrinos lanzados al espacio por el Sol están atravesando su cuerpo y también la Tierra, como parte de su largo viaje a través del cosmos. A finales de la década de 1930, otra partícula llamada *muon* —idéntica a un electrón, salvo por ser 200 veces más pesada que éste— fue descubierta por unos físicos que estudiaban los rayos cósmicos (lluvias de partículas que bombardean la Tierra desde el espacio exterior). Dado que no había nada en el orden cósmico, ni tampoco un rompecabezas sin resolver, ni un nicho hecho a la medida que necesitara la existencia del muon, el físico de partículas galardonado con el premio Nobel, Isidor Isaac Rabi, saludó el descubrimiento del muon diciendo con muy poco entusiasmo «¿Quién había pedido esto?». Sin embargo, ahí estaba. Y aún vendría más.

Utilizando una tecnología todavía más poderosa, los físicos han continuado juntando a golpes trozos de materia con una energía cada vez mayor, recreando en cada instante unas condiciones que no se habían dado desde el big bang. En los escombros resultantes han buscado nuevos componentes fundamentales, para añadirlos a la lista, cada vez más larga, de partículas. He aquí lo que han hallado: cuatro quarks más, llamados encanto (charm), extraño (strange), fondo (bottom) y cima (top), y un pariente aún más pesado del electrón, al que se ha denominado *tau*, así como otras dos partículas con propiedades similares a las del neutrino, que se llaman *muon-neutrino* y *tau-neutrino*, para distinguirlas del neutrino original, que actualmente se denomina *electrón-neutrino*. Estas partículas se producen como resultado de colisiones a altas energías y tienen una existencia efímera; no son constituyentes que podamos percibir en nuestro entorno habitual. Sin embargo, tampoco acaba aquí la historia: Cada una de estas partículas tiene como pareja una *antipartícula*, es decir, una partícula de masa idéntica pero que es opuesta a ella en algunos otros aspectos, como, por ejemplo, su carga eléctrica (así como sus cargas en relación con otras fuerzas de las que hablaremos más adelante). Por ejemplo, la antipartícula de un electrón se llama *positrón*, y tiene exactamente la misma masa que un electrón, pero su carga eléctrica es +1, mientras que la carga eléctrica del electrón es –1. Cuando se ponen en contacto, la materia y la antimateria pueden aniquilarse mutuamente para producir energía pura; ésta es la razón por la cual la existencia de la

antimateria en el mundo que nos rodea es extremadamente poco natural.

Los físicos han observado entre estas partículas una pauta que se refleja en la Tabla 1.1. Las partículas que constituyen la materia se clasifican en tres grupos que, a menudo, se denominan *familias*. Cada familia contiene dos quarks, un electrón o uno de sus parientes, y además una partícula de la especie de los neutrinos. El tipo de partícula correspondiente en las tres familias tiene propiedades idénticas, salvo en lo relativo a su masa, que se hace mayor a medida que pasamos de una familia a la siguiente. El resultado es que los físicos han comprobado ya la estructura de la materia hasta escalas de alrededor de una trillonésima de metro y han demostrado que *todo* lo que se ha encontrado hasta ahora —tanto si se encuentra en la naturaleza, como si se produce artificialmente en gigantescos aceleradores de partículas atómicas — consiste en una cierta combinación de partículas de estas tres familias y de sus parejas de antimateria.

Si echamos un vistazo a la Tabla 1.1, nos quedaremos, sin duda, con una fuerte sensación de perplejidad similar a la de Rabi cuando se descubrió el muon. El agrupamiento en familias produce al menos la impresión de algo ordenado, pero surgen innumerables preguntas que empiezan por ¿Por qué…? ¿Por qué existen tantas partículas fundamentales, cuando parece que la gran mayoría de las cosas que se encuentran en el mundo que nos rodea sólo necesitan electrones, quarks arriba y quarks abajo? ¿Por qué hay tres familias? ¿Por qué no una familia o cuatro familias, o cualquier otro número? ¿Por qué tienen las partículas una variedad de masas aparentemente aleatoria? ¿Por qué, por ejemplo, el tau pesa alrededor de 3.520 veces lo que pesa un electrón? ¿Por qué el quark cima pesa cerca de 40.200 veces el peso de un quark arriba? Son unos números extraños, aparentemente aleatorios. ¿Son así por azar, por algún designio divino, o existe una explicación científica comprensible para estas características fundamentales de nuestro universo?

Familia 1		**Familia 2**		**Familia 3**	
Partícula	Masa	Partícula	Masa	Partícula	Masa
Electrón	.00054	Muon	.11	Tau	1.9
Electrón-neutrino	$<10^{-8}$	Muon-neutrino	<.0003	Tau-neutrino	<.033
Up-quark	.0047	Charm Quark	1.6	Top Quark	189
Down-quark	.0074	Strange Quark	.16	Bottom Quark	5.2

Tabla 1.1 Las tres familias de partículas fundamentales y sus masas (en multiplos de la masa del protón). Los valores de la masa del neutrino han eludido hasta ahora la determinación experimental.

Las fuerzas o ¿dónde está el fotón?

Cuando tenemos en cuenta las fuerzas que actúan en la naturaleza, lo único que conseguimos es complicar las cosas aún más. El mundo que nos rodea está lleno de medios de ejercer influencia: las pelotas se pueden golpear mediante raquetas o palas, los aficionados al *bungee* se pueden lanzar hacia el suelo desde elevadas plataformas, los imanes pueden mantener a los trenes de alta velocidad sobre carriles metálicos, los contadores Geiger pueden sonar como respuesta a la presencia de material radiactivo, las bombas termonucleares pueden explotar. Se puede actuar sobre los objetos empujándolos, tirando de ellos o agitándolos vigorosamente; también lanzando o disparando otros objetos contra ellos; estirándolos, retorciéndolos o aplastándolos; congelándolos, calentándolos o quemándolos. Durante los últimos cien años, los físicos han acumulado un número de pruebas cada vez mayor de que todas estas interacciones entre objetos o materiales distintos, así como cualquiera de las interacciones que por millones y millones se observan a diario, se pueden reducir a combinaciones de cuatro fuerzas fundamentales. Una de éstas es la fuerza de la gravedad. Las otras tres son la fuerza *electromagnética*, la fuerza *nuclear débil* y la fuerza *nuclear fuerte*.

La fuerza de la gravedad es, de las tres, la que nos resulta más familiar. Es la responsable de que nos mantengamos en órbita alrededor del Sol, y también de que nuestros pies permanezcan firmemente plantados sobre el suelo. La masa de un objeto determina la medida de cuánta fuerza de la gravedad puede ejercer o soportar dicho objeto. A continuación, la más familiar para nosotros es la fuerza electromagnética. Es la fuerza que hace funcionar todas las comodidades de la vida moderna —iluminación, ordenadores, televisores, teléfonos— y subyace al poder terrorífico de las tormentas con aparato eléctrico y al suave tacto de una mano humana. Microscópicamente, la carga eléctrica de una partícula desempeña la misma función en relación con la fuerza electromagnética que la que desempeña la masa en relación con la gravedad: determina la fuerza electromagnética que puede ejercer una partícula o la fuerza con que puede responder electromagnéticamente esa partícula.

Las fuerzas denominadas, respectivamente, nuclear fuerte y nuclear débil nos resultan menos familiares, porque su magnitud disminuye rápidamente a escalas de distancias casi subatómicas; son las fuerzas nucleares. Ésta es también la razón por la que se descubrieron mucho más recientemente que las otras dos fuerzas. La fuerza nuclear fuerte es la responsable de que los quarks se mantengan «pegados» unos a otros dentro de los protones y los neutrones, y de que los propios protones y neutrones estén estrechamente apiñados dentro del núcleo del átomo. La fuerza nuclear débil se conoce sobre todo como la fuerza responsable de la desintegración radiactiva de sustancias como el uranio y el cobalto.

Durante el último siglo, los físicos han descubierto dos características comunes a todas estas fuerzas. En primer lugar, como veremos en el capítulo 5, a nivel

microscópico todas las fuerzas tienen asociada una partícula que se puede considerar como el mínimo paquete o haz que puede formar la fuerza. Si se dispara un haz de rayos láser —una «escopeta de rayos electromagnéticos»— se está disparando un chorro de *fotones* que es el haz mínimo de fuerza electromagnética. De manera similar, los constituyentes más pequeños de los campos de la fuerza nuclear débil y de la fuerza nuclear fuerte son partículas llamadas *bosones gauge* asociados a la fuerza nuclear débil y *gluones*. (El nombre *gluón* es especialmente descriptivo: se puede pensar en los gluones considerándolos como el componente microscópico del fuerte pegamento (glue) que mantiene unidos los elementos de los núcleos de los átomos). En 1984, los físicos que realizaban experimentos al respecto, ya habían establecido definitivamente la existencia y las propiedades detalladas de estos tres tipos de partículas de fuerza, reseñadas en la Tabla 1.2. Los físicos creen que la fuerza de la gravedad también tiene una partícula asociada —el gravitón— pero su existencia está aún pendiente de confirmarse experimentalmente.

Los científicos no suelen traducir al castellano la palabra gauge. En los diferentes términos compuestos en que aparece, se podría traducir como «de calibre» o «de calibración».

Fuerza	Partícula asociada	Masa
Nuclear fuerte	Gluón	0
Electromagnética	Fotón	0
Nuclear débil	Bosones gauge débiles	86,97
Gravedad	Gravitón	0

Tabla 1.2 Las cuatro fuerzas de la naturaleza, junto con sus partículas de fuerza asociadas y sus masas en múltiplos de la masa del protón. (Las partículas de fuerza débil vienen en variedades con las dos masas posibles listadas. Estudios teóricos demuestran que el gravitón no debería tener masa).

La segunda característica común a estas fuerzas es que, del mismo modo que la masa determina cómo afecta la gravedad a una partícula, y su carga eléctrica determina cómo le afecta la fuerza electromagnética, las partículas están provistas de ciertas cantidades de «carga fuerte» y «carga débil» que determinan cómo se verán afectadas dichas partículas por la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. (Estas propiedades se detallan en la tabla que aparece en las notas finales correspondientes a este capítulo[1]). Sin embargo, al igual que sucede con las masas de las partículas, más allá del hecho de que los físicos experimentales han medido minuciosamente estas propiedades, nadie tiene una explicación de por qué nuestro universo está compuesto precisamente por esas partículas, con esas masas y cargas de fuerza tan peculiares.

A pesar de sus características comunes, el examen de las propias fuerzas fundamentales sólo sirve para plantear preguntas. Por ejemplo, ¿por qué son cuatro

las fuerzas fundamentales? ¿Por qué no cinco, o tres, o quizá sólo una? ¿Por qué tienen estas fuerzas unas propiedades diferentes? ¿Por qué las fuerzas llamadas nuclear fuerte y nuclear débil se limitan a operar a escalas microscópicas, mientras que la fuerza de la gravedad y la electromagnética tienen un alcance ilimitado en su influencia? Y, ¿por qué existe una gama enorme en cuanto a la intensidad intrínseca de estas fuerzas?

Para valorar la última pregunta, imaginemos que sostenemos un electrón con la mano izquierda y otro en la derecha, y que aproximamos estas dos partículas de idéntica carga eléctrica intentando juntarlas. Su atracción gravitatoria mutua favorecerá que se acerquen, mientras que su fuerza de repulsión electromagnética intentará separarlas. ¿Cuál de estas dos fuerzas es más intensa? No hay discusión posible: la repulsión electromagnética es un millón de billones de billones de billones (10 a la 42) de veces más fuerte. Si el bíceps derecho representa la intensidad de la fuerza de la gravedad, entonces el bíceps izquierdo tendría que ser tan grande que sobrepasara los límites del universo conocido para poder representar la intensidad de la fuerza electromagnética. La única razón por la que la fuerza electromagnética no aplasta completamente a la fuerza de la gravedad en el mundo que nos rodea es que la mayoría de las cosas están compuestas por una cantidad igual de cargas eléctricas positivas y negativas cuyas fuerzas se cancelan mutuamente. Por otra parte, ya que la gravedad siempre es una fuerza de atracción, no existen cancelaciones análogas —más materia significa una fuerza de la gravedad mayor—. Sin embargo, hablando de partículas fundamentales, se puede afirmar que la fuerza de la gravedad es en este contexto una fuerza extremadamente débil. (Un hecho que explica la dificultad para confirmar experimentalmente la existencia del gravitón. Buscar el haz más pequeño de la fuerza más débil es todo un desafío). También hay experimentos que han demostrado que la fuerza nuclear fuerte es alrededor de cien veces más fuerte que la fuerza electromagnética y cerca de cien mil veces más fuerte que la fuerza nuclear débil. Pero ¿dónde está por qué —la razón de ser— de que nuestro universo tenga estas características?

Ésta no es una pregunta ligada a una actitud de filosofar inútilmente sobre cuál sería la causa de que ciertos detalles resulten ser de un modo en vez de ser de otro; el universo sería un lugar sumamente diferente si las propiedades de la materia y de las partículas de fuerza sufrieran algún cambio, aunque éste fuera muy moderado. Por ejemplo, la existencia de núcleos estables que forman los alrededor de cien elementos de la tabla periódica depende directamente de la proporción entre las magnitudes de la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética. Los protones que se apiñan juntos en los núcleos de los átomos se repelen todos ellos electromagnéticamente entre sí; la fuerza nuclear fuerte que actúa entre los quarks de que están formados, afortunadamente, logra vencer esta repulsión y ata los protones firmemente. Sin

embargo, cualquier pequeño cambio en las intensidades relativas de estas dos fuerzas perturbaría fácilmente el equilibrio existente entre ellas y haría que se desintegraran la mayoría de los núcleos atómicos. Aún más, si la masa del electrón fuera unas pocas veces mayor de lo que es, los electrones y los protones tenderían a combinarse para formar neutrones, engullendo los núcleos de hidrógeno (el elemento más sencillo del cosmos, ya que su núcleo contiene un único protón) e impidiendo la producción de elementos más complejos. La existencia de las estrellas se basa en la fusión entre núcleos estables y no se formarían si se produjeran estas alteraciones en la física fundamental. La magnitud de la fuerza de la gravedad también desempeña un papel en la formación de las estrellas. La impresionante densidad de la materia en el núcleo central de una estrella potencia su horno nuclear y es la base de ese resplandor resultante, que es la luz estelar. Si la intensidad de la fuerza de la gravedad aumentara, la masa estelar se uniría con más fuerza, causando un incremento significativo en la velocidad de las reacciones nucleares. Pero, del mismo modo que una bengala resplandeciente agota su combustible mucho más rápido que una vela que arde lentamente, un incremento en la velocidad de las reacciones nucleares haría que estrellas como el Sol se quemaran mucho más rápidamente, lo cual tendría, como ya sabemos, un efecto devastador en la formación de seres vivos. Por otra parte, si disminuyera significativamente la intensidad de la fuerza de la gravedad, la materia no se uniría formando bloques, con lo que se impediría la formación de estrellas y galaxias.

Podríamos seguir enumerando casos de este tipo, pero la idea ya ha quedado clara: el universo es como es porque las partículas de la materia y de las fuerzas tienen las propiedades que tienen. Ahora bien, ¿es esto una explicación científica de *por qué* tienen estas propiedades?

Teoría de cuerdas: la idea básica

La teoría de cuerdas ofrece un paradigma conceptual poderoso mediante el cual, por primera vez, ha surgido un marco en el que contestar a estas preguntas. En primer lugar, veamos cuál es el concepto básico.

Las partículas que aparecen en la Tabla 1.1 son las «letras» de todo tipo de materia. Igual que sus colegas lingüísticas, parecen no tener otras subestructuras internas. La teoría de cuerdas afirma otra cosa. Según esta teoría, si pudiéramos examinar estas partículas con una precisión aún mayor —una precisión que estuviera en muchos grados de magnitud más allá de nuestra capacidad tecnológica actual—

descubriríamos que ninguna es como un punto, sino que cada una de ellas está formada por un diminuto *bucle* unidimensional. Cada partícula contiene un filamento que vibra, oscila y baila como un elástico de goma infinitamente delgado que los físicos han denominado *cuerda*, porque no tienen el talento literario de Gell-Mann. En la Figura 1.1 expresamos gráficamente este concepto esencial de la teoría de cuerdas, comenzando con un trozo de materia corriente, una manzana, y ampliando repetidas veces su estructura hasta poder ver los componentes que la forman a escalas cada vez menores. La teoría de cuerdas añade la nueva categoría microscópica del bucle vibrador, que continúa la progresión conocida con anterioridad, es decir, la que va desde los átomos, a través de los protones, neutrones, electrones y quarks.[2]

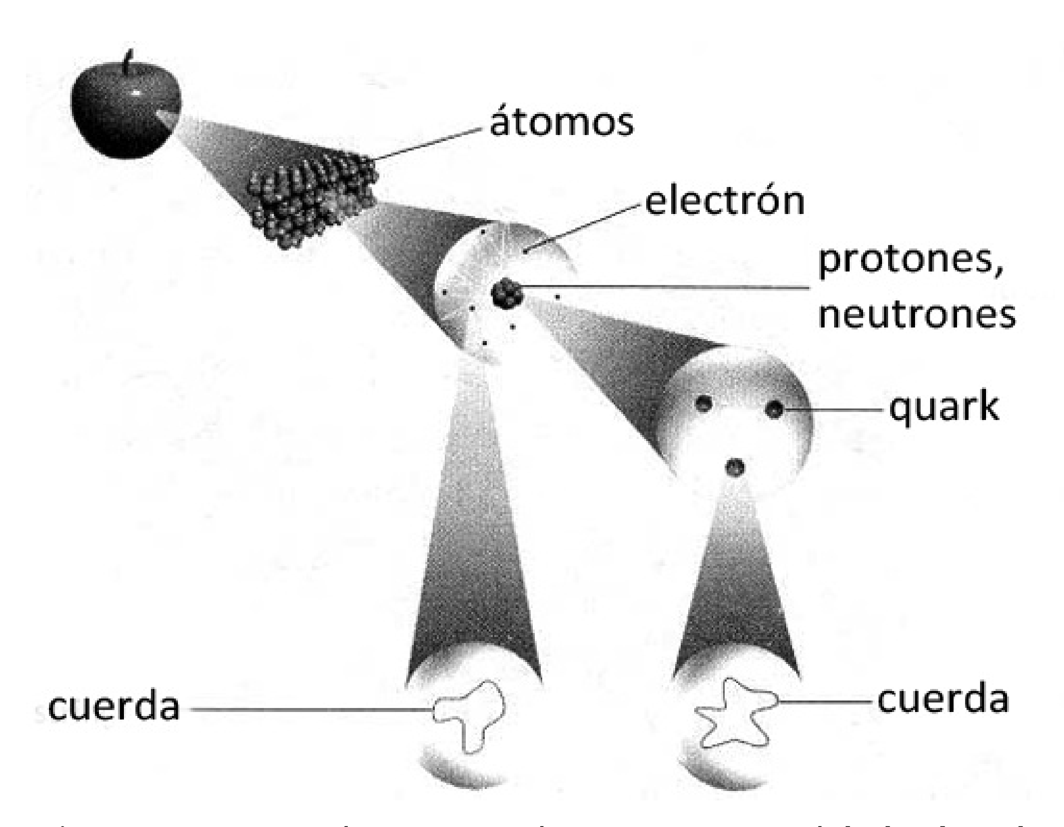


Figura 1.1 La materia está compuesta por átomos, que a su vez están hechos de quarks y electrones. Según la teoría de cuerdas, todas estas partículas son en realidad diminutos bucles de cuerda vibrante.

Aunque no es de ninguna manera obvio, veremos en el capítulo 6 que esta simple sustitución de los componentes materiales de la partícula puntual por cuerdas resuelve la incompatibilidad existente entre la mecánica cuántica y la relatividad general. Así, la teoría de cuerdas desenmaraña el nudo gordiano central de la física teórica contemporánea. Esto es un logro enorme, pero sin embargo sólo es parte de la razón por la cual la teoría de cuerdas ha generado tanta expectación.

La teoría de cuerdas como la teoría unificada de todo

En la época de Einstein, no se habían descubierto aún la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil, pero él opinaba que la existencia de dos fuerzas distintas —la de la gravedad y la electromagnética— era profundamente preocupante. Einstein no aceptaba que la naturaleza se basara en un modelo tan extravagante. Esta opinión puso en marcha su viaje de treinta años en búsqueda de la denominada *teoría de campo unificado*, de la cual esperaba como resultado la demostración de que estas dos fuerzas fueran en realidad manifestaciones de un único gran principio en el que ambas se basaran. Esta búsqueda quijotesca aisló a Einstein de la corriente principal de la física, que, comprensiblemente, estaba más interesada en profundizar en el marco de la mecánica cuántica, que había surgido recientemente. A principios de la década de 1940 escribía a un amigo: «Me he convertido en un tipo viejo y solitario que es conocido principalmente por no usar calcetines y al que se exhibe como una curiosidad en ocasiones especiales».[3]

Lo que sucedía era que Einstein, sencillamente, se anticipaba a su época. Más de un siglo después, su sueño de una teoría unificada se ha convertido en el Santo Grial de la física moderna. Una parte considerable de la comunidad física y matemática está cada vez más convencida de que la teoría de cuerdas puede proporcionamos la respuesta. A partir de un principio —en su nivel más microscópico, todo consiste en combinaciones de hilos vibradores— la teoría de cuerdas aporta un único marco explicativo capaz de abarcar todas las fuerzas y toda la materia.

La teoría de cuerdas afirma, por ejemplo, que las propiedades que se han observado en las partículas, los datos recogidos en las Tablas 1.1 y 1.2, son un reflejo de los distintos modos en que una cuerda puede vibrar. Del mismo modo que las cuerdas de un violín o de un piano tienen unas frecuencias de resonancia predilectas a la hora de vibrar —pautas que nuestros oídos perciben como las diversas notas musicales y sus armónicos más altos— así sucede con los bucles de la teoría de cuerdas. Sin embargo, ya veremos que, en vez de producir notas musicales, cada una de las pautas o modelos de vibración preferidos de una cuerda dentro de la teoría de cuerdas se presenta como una partícula cuyas cargas de fuerza y de masa están determinadas por el modelo de oscilación de la cuerda. El electrón es una cuerda que vibra de un modo, el quark alto es otra que vibra de otro modo, y así en general. Lejos de ser una colección de hechos experimentales, las propiedades de las partículas dentro de la teoría de cuerdas son la manifestación de una única característica física: los resonantes modelos de vibración —es decir, la música— de los bucles de cuerda fundamentales. La misma idea es asimismo aplicable a las fuerzas de la naturaleza. Veremos que las partículas de fuerza también están asociadas con modelos específicos de vibración de cuerdas y por tanto todo, toda la materia y

todas las fuerzas, está unificado bajo la misma rúbrica de oscilaciones microscópicas de cuerdas, es decir, las «notas» que las cuerdas pueden producir.

En consecuencia, por primera vez en la historia de la física disponemos de un marco en el que se puede explicar cualquiera de las características fundamentales sobre las que está construido el universo. Por esta razón, se dice a veces sobre la teoría de cuerdas que puede ser la «teoría para todo» *theory of everything*: T.O.E. (Estas siglas se prestan a un juego de palabras en inglés, ya que *toe* significa «dedo del pie» o «punta del pie», es decir, lo último de una extremidad del cuerpo) o la teoría «última» o «final». Estas expresiones descriptivas grandiosas pretenden dar a entender que se trata de la más profunda de las teorías posibles dentro de la física —una teoría que es la base de todas las demás, que no requiere, o ni siquiera permite, una base explicativa más profunda—. En la práctica, muchos expertos en teoría de cuerdas adoptan un planteamiento más cercano a la realidad y piensan en una T.O.E. con el sentido más limitado de una teoría que pueda explicar las propiedades de las partículas fundamentales y las propiedades de las fuerzas mediante las cuales dichas partículas interaccionan unas con otras y ejercen influencias mutuas. Un reduccionista inquebrantable afirmaría que esto no es en absoluto una limitación y que, en principio, absolutamente todo, desde el *big bang* hasta las ensoñaciones, se puede describir en términos de procesos físicos microscópicos subyacentes en los que participan los componentes fundamentales de la materia. Si se comprende todo sobre los componentes, afirma el reduccionista, se comprende cualquier cosa.

La filosofía reduccionista suscita fácilmente un ardiente debate. Muchos piensan que es fatuo y totalmente repugnante afirmar que las maravillas de la vida y del universo sean meros reflejos de unas partículas microscópicas implicadas en una danza sin sentido totalmente coreografiada por las leyes de la física. ¿Es realmente posible que los sentimientos de alegría, pena o aburrimiento no sean más que unas reacciones químicas que tienen lugar en el cerebro, unas reacciones entre moléculas y átomos que, yendo a un nivel aún más microscópico, son reacciones entre algunas de las partículas que figuran en la Tabla 1.1, las cuales en realidad no son sino unas cuerdas vibrantes? En respuesta a esta línea de argumentación, veamos las advertencias del premio Nobel Steven Weinberg en *Dreams of a Final Theory*:

> En el otro extremo del espectro se encuentran los contrarios al reduccionismo que están horrorizados por lo que consideran la frialdad de la ciencia moderna. En la medida en que ellos y su mundo puedan verse de alguna forma reducidos a una cuestión de partículas o campos y sus interacciones, sienten que esa forma de conocimiento les hace quedar disminuidos… No intentaría responder a esas críticas con un discurso enérgico sobre la belleza de la ciencia moderna. La manera de ver el mundo

> de un reduccionista *es* fría e impersonal. Ha de aceptarse tal como es, no porque nos guste, sino porque ése es el modo en que funciona el mundo.[4]

Algunos están de acuerdo con este tajante punto de vista, pero otros no.

Otros han intentado argumentar que planteamientos tales como la teoría del caos nos dicen que, a medida que el nivel de complejidad de un sistema aumenta, entran en juego nuevos tipos de leyes. Entender el comportamiento de un electrón o un quark es una cosa; utilizar este conocimiento para comprender el comportamiento de un tornado es otra muy diferente. La mayoría está de acuerdo con este aspecto. Sin embargo, las opiniones divergen con respecto a si los fenómenos diversos y a veces inesperados que pueden darse en sistemas más complejos que las partículas individuales son realmente representativos del funcionamiento de los nuevos principios físicos, o si los principios implicados son algo derivado y están basados, aunque sea de un modo terriblemente complicado, en los principios físicos que gobiernan el ingente número de componentes elementales. Mi opinión personal es que no representan ninguna ley física nueva e independiente. A pesar de que sería difícil explicar las propiedades de un tornado aplicando la física de los electrones y los quarks, creo que esto es una cuestión de dificultad en los cálculos, no un indicador de la necesidad de leyes físicas nuevas. Pero, insisto, hay algunos que no están de acuerdo con este punto de vista.

Lo que está en gran medida más allá de toda cuestión y es de primordial importancia para el viaje que se describe en este libro es que, incluso si se acepta el discutible razonamiento del reduccionista inquebrantable, los principios son una cosa y la práctica otra. Casi todo el mundo está de acuerdo en que el hallazgo de la T.O.E. no significaría de modo alguno que la psicología, la biología, la geología, la química, e incluso la física, hubieran resuelto sus problemas o, en cierto sentido, los hubieran incluido en un planteamiento especial. El universo es un lugar tan maravillosamente rico y complejo que el descubrimiento de la teoría final, en el sentido en que lo planteamos aquí, no supondría el fin de la ciencia. Más bien al contrario: el hallazgo de la T.O.E. —la explicación última del universo a su nivel más microscópico, una teoría que no estaría basada en ninguna explicación más profunda— nos aportaría el fundamento más firme sobre el que se podría *construir* nuestra comprensión del mundo. Su descubrimiento marcaría un principio, no un final. La teoría última proporcionaría para siempre un pilar inmutable de coherencia, garantizándonos que el universo es un lugar comprensible.

El estado actual de la teoría de cuerdas

La preocupación principal de este libro es explicar el funcionamiento de los distintos procesos del universo según la teoría de cuerdas, poniendo un énfasis especial en las implicaciones que esta teoría tiene para nuestra comprensión del espacio y el tiempo. A diferencia de otras muchas explicaciones sobre teorías científicas, la que se ofrece aquí no se refiere a una teoría que haya sido desarrollada de forma completa, confirmada por comprobaciones experimentales rigurosas y totalmente aceptada por la comunidad científica. La razón de esto es, como ya comentaremos en capítulos posteriores, que la teoría de cuerdas es una estructura teórica tan profunda y complicada que, incluso con los considerables progresos que ha realizado durante las últimas dos décadas, aún nos queda un largo camino antes de que podamos afirmar que hemos logrado dominarla completamente.

Por lo tanto, hay que considerar la teoría de cuerdas como un trabajo que se está realizando y cuyos logros parciales ya han revelado unas asombrosas ideas sobre la naturaleza del espacio, el tiempo y la materia. La armoniosa combinación de la relatividad general y la mecánica cuántica es un éxito importante. Además, a diferencia de lo que sucedía con cualquiera de las teorías anteriores, la teoría de cuerdas tiene la capacidad de responder a cuestiones primordiales que tienen relación con las fuerzas y los componentes más fundamentales de la naturaleza. Igualmente importante, aunque algo más difícil de expresar es la notable elegancia tanto de las respuestas que propone la teoría de cuerdas, como del marco en que se generan dichas respuestas. Por ejemplo, en la teoría de cuerdas muchos aspectos de la naturaleza que podrían parecer detalles técnicos arbitrarios —como el número de partículas fundamentales distintas y sus propiedades respectivas— surgen a partir de aspectos esenciales y tangibles de la geometría del universo. Si la teoría de cuerdas es correcta, la estructura microscópica de nuestro universo es un laberinto multidimensional ricamente entrelazado, dentro del cual las cuerdas del universo se retuercen y vibran en un movimiento infinito, marcando el ritmo de las leyes del cosmos. Lejos de ser unos detalles accidentales, las propiedades de los bloques básicos que construyen la naturaleza están profundamente entrelazadas con la estructura del espacio y el tiempo.

Sin embargo, en un análisis final, se puede decir que nada sustituye las predicciones definitivas y comprobables que podrán determinar si la teoría de cuerdas ha levantado realmente el velo de misterio que impedía ver las verdades más profundas del universo. Puede que tenga que pasar un tiempo hasta que nuestro nivel de comprensión haya Profundizado lo suficiente para alcanzar este objetivo, aunque, como veremos en el capítulo 9, durante los próximos diez años, más o menos, las pruebas experimentales podrían proporcionar un sólido fundamento circunstancial

para la teoría de cuerdas. Además, en el capítulo 13 veremos que la teoría de cuerdas ha resuelto recientemente un problema primordial relativo a los agujeros negros, asociado con la llamada entropía de Bekenstein-Hawking, que se había resistido pertinazmente durante más de veinticinco años a ser solucionada con medios más convencionales. Este éxito ha convencido a muchos de que la teoría de cuerdas está en el camino correcto para proporcionamos la comprensión más profunda posible sobre el modo en que funciona el universo.

Edward Witten, uno de los pioneros y más relevantes expertos en teoría de cuerdas, resume la situación diciendo que *«la teoría de cuerdas es una parte de la física del siglo XXI que, por azar, cayó en el siglo XX»*, una valoración que fue realizada primero por el famoso físico italiano Danielle Amati.[5] Así pues, en cierto modo, es como si a nuestros antepasados de finales del siglo XIX se les hubiera puesto delante un superordenador de última generación con el correspondiente manual de instrucciones. Mediante tanteos llenos de inventiva, habrían llegado a ser evidentes ciertos indicios del poder del superordenador, pero obtener una auténtica maestría les habría costado un esfuerzo vigoroso y prolongado. Esos indicios del potencial del ordenador, como lo que nosotros vislumbramos del poder explicativo de la teoría de cuerdas, habrían aportado una motivación extraordinariamente fuerte para lograr un completo manejo. Actualmente, una motivación similar está aportando energía a toda una generación de físicos teóricos para intentar conseguir una comprensión analítica completa y precisa de la teoría de cuerdas.

La observación de Witten y las de otros expertos en el mismo campo indican que podrían transcurrir décadas e incluso siglos antes de que la teoría de cuerdas se desarrolle y se comprenda de una manera completa. Esto puede ser realmente cierto. De hecho, las matemáticas de la teoría de cuerdas son tan complicadas que, hasta ahora, nadie conoce ni siquiera las ecuaciones de las fórmulas exactas de esta teoría. Lo que sí es cierto es que los físicos conocen únicamente unas aproximaciones de dichas ecuaciones, e incluso estas ecuaciones aproximadas resultan ser tan complicadas que hasta la fecha sólo se han resuelto parcialmente. Sin embargo, un inspirador conjunto de avances realizados en la década de 1990 —avances que han dado respuesta a cuestiones teóricas de una dificultad hasta ahora inimaginable— puede muy probablemente indicar que la comprensión cuantitativa completa de la teoría de cuerdas está mucho más cerca de lo que se pensaba inicialmente. Repartidos por todo el mundo hay físicos que están desarrollando técnicas nuevas y poderosas encaminadas a trascender los numerosos métodos aproximados que se han utilizado hasta ahora, y lo hacen colectivamente a una velocidad estimulante, uniendo elementos dispares del rompecabezas que es la teoría de cuerdas.

Sorprendentemente, estos avances están aportando nuevas posiciones ventajosas para reinterpretar algunos de los aspectos básicos de esta teoría que han estado sin

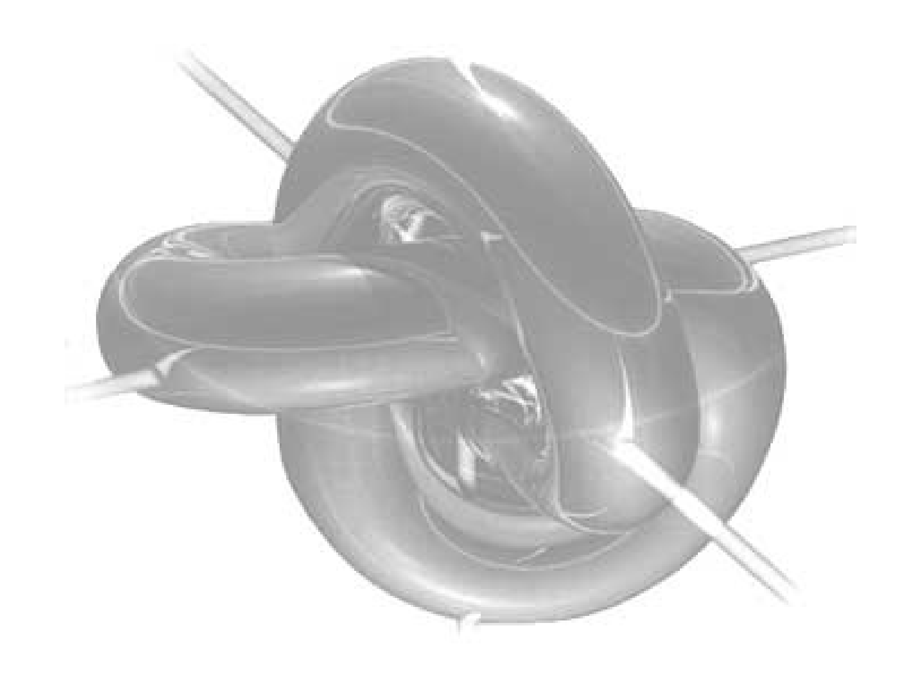
respuesta durante cierto tiempo. Por ejemplo, una pregunta inmediata que puede haberse planteado el lector al observar la Figura 1.1 es ¿por qué cuerdas? ¿Por qué no pequeños discos de *Frisbee*? (Juego en el que se utiliza un disco ligero de plástico en forma de plato que se lanzan unos jugadores a otros. *Frisbee* es una marca registrada) ¿O unas pepitas como gotas microscópicas? ¿O una combinación de todas esas posibilidades? Como veremos en el capítulo 12, las ideas más recientes muestran que estos u otros tipos de componentes *sí que tienen* un papel importante en la teoría de cuerdas, y han revelado que dicha teoría es en realidad parte de una síntesis aún mayor, llamada actualmente (y por alguna razón misteriosa) teoría-M. Estos últimos avances serán el tema de los últimos capítulos del libro.

Los adelantos científicos vienen por rachas. Algunos períodos están repletos de grandes avances, mientras que en otras épocas los investigadores sufren una especie de sequía. Los científicos plantean sus resultados, tanto teóricos como prácticos. A continuación, la comunidad científica debate sobre dichos resultados, que a veces son descartados, otras veces se modifican, y en ocasiones estos logros proporcionan un trampolín inspirador para llegar a un modo nuevo y más preciso de comprender el universo físico. En otras palabras, la ciencia camina por un sendero zigzagueante hacia lo que esperamos que será la verdad última, un camino que empezó con los primeros intentos de la humanidad por comprender el misterio del cosmos y cuyo final no podemos predecir. No sabemos si la teoría de cuerdas es una parada circunstancial en ese camino, un hito crucial o, de hecho, ese destino final que no conocemos. Sin embargo, las últimas dos décadas de investigación llevada a cabo por cientos de físicos y matemáticos de numerosos países nos han proporcionado una bien fundada esperanza de que estamos en un camino acertado y posiblemente final.

El hecho de que nuestro actual nivel de conocimientos nos haya permitido obtener nuevas perspectivas impactantes en relación con el funcionamiento del universo es un testamento revelador de la rica naturaleza de la teoría de cuerdas y de su largo alcance. En lo que aquí sigue, el hilo central estará constituido por aquellos logros que lleven hacia delante la revolución en nuestra comprensión del espacio y el tiempo, iniciada ya por las teorías especial y general de la relatividad de Einstein. Veremos que, si la teoría de cuerdas es correcta, la estructura de nuestro universo tiene propiedades que probablemente habrían deslumbrado incluso a Einstein.

Parte II

El Dilema del Espacio, el Tiempo y los Cuantos



Capítulo 2

El espacio, el Tiempo, y el ojo del observador

En junio de 1905, Albert Einstein, a la edad de veintiséis años, presentó un artículo técnico a los *Annals of Physics* de Alemania en el que abordaba una paradoja relativa a la luz que ya le tenía preocupado diez años antes, cuando era sólo un adolescente. Después de leer la última página del manuscrito de Einstein, el editor de la revista, Max Planck, se dio cuenta de que el artículo subvertía el orden científico generalmente aceptado hasta entonces. Sin alardes ni fanfarrias, un empleado de patentes de Berna, Suiza, había dado un vuelco completo a las nociones tradicionales de espacio y tiempo, y las había sustituido por un nuevo concepto cuyas propiedades se oponen a todo aquello que nos resulta familiar a partir de la experiencia cotidiana.

La paradoja que había preocupado a Einstein durante una década era la siguiente. A mediados del siglo XIX, después de un estudio minucioso de la obra experimental del físico inglés Michael Faraday, el físico escocés James Clerk Maxwell logró unir la electricidad y el magnetismo en el marco del *campo electromagnético*. Si ha estado usted alguna vez en la cima de una montaña justo antes de desencadenarse una fuerte tormenta o se ha colocado cerca de un generador de Van de Graaf, tendrá una idea corporal de lo que es un campo electromagnético, porque lo habrá sentido. En el caso de que no tenga esta experiencia, sepa que es algo parecido a una marea de líneas de fuerza eléctricas y magnéticas que impregnan la región del espacio por la que atraviesan. Por ejemplo, cuando se diseminan limaduras de hierro en las proximidades de un imán, la pauta ordenada que forman sigue la traza de las líneas invisibles de la fuerza magnética. Cuando nos quitamos un jersey de lana en un día especialmente seco y oímos una crepitación, además de sentir quizá un golpe momentáneo, o dos, estamos siendo testigos de la evidencia de líneas eléctricas de fuerza generadas por cargas eléctricas que han sido recogidas por las fibras de nuestro jersey. Además de reunir estos y todos los demás fenómenos eléctricos y magnéticos en un marco matemático, la teoría de Maxwell muestra —y eso resultaba entonces bastante inesperado— que las perturbaciones electromagnéticas viajan a una

velocidad fija e invariable, una velocidad que resulta ser igual que la velocidad de la luz. A partir de esto, Maxwell constató que la luz visible en sí misma no es sino un tipo particular de onda electromagnética, de la que actualmente se sabe que interacciona con sustancias químicas en la retina, dando lugar así a la sensación de ver. Además (y esto es crucial), la teoría de Maxwell también demostraba que todas las ondas electromagnéticas —entre ellas la luz visible— son la personificación del viajero peripatético. Nunca se detienen. Nunca reducen su velocidad. La luz *siempre* viaja a la velocidad de la luz.

Todo va bien hasta que nos preguntamos, como lo hizo Einstein cuando tenía dieciséis años, ¿qué sucede si vamos tras un rayo de luz moviéndonos a la velocidad de la luz? El razonamiento intuitivo, basado en las leyes del movimiento de Newton, nos dice que estaremos a la par de las ondas luminosas y entonces nos parecerán estacionarias; la luz se quedará quieta. Sin embargo, según la teoría de Maxwell, y todas las observaciones fiables, sencillamente no existe la luz quieta: nadie ha podido nunca sostener en la palma de su mano un trozo de luz. Aquí está el problema. Afortunadamente, Einstein no sabía que gran parte de los físicos más destacados del mundo estaban enfrentándose con esta cuestión (y estaban avanzando por un camino que en gran medida era equivocado) y reflexionaban largamente sobre la paradoja de Maxwell y Newton en la prístina intimidad de sus propios pensamientos.

En este capítulo comentaremos cómo resolvió Einstein el conflicto mediante su teoría especial de la relatividad y así cambió para siempre nuestra manera de concebir el espacio y el tiempo. Quizá resulte sorprendente que el objetivo esencial de la teoría especial de la relatividad es comprender de un modo preciso cómo se presenta el mundo ante los individuos, llamados a menudo «observadores», que se mueven desplazándose los unos respectivamente a los otros. Al principio puede parecer que esto es un ejercicio intelectual de mínima importancia. Es más bien lo contrario: en las manos de Einstein, con sus juegos de imaginar observadores que van detrás de rayos de luz, existen profundas implicaciones con el hecho de comprender de un modo total cómo se presentan las situaciones más cotidianas ante la percepción de individuos que realizan movimientos relativos.

La intuición y sus fallos

La experiencia cotidiana ofrece ejemplos de casos en los que las observaciones de los individuos difieren. Los árboles situados a lo largo de una carretera, por ejemplo, parecen estar en movimiento desde el punto de vista de un conductor, pero parecen

estar quietos para un autoestopista que está sentado en una barandilla. De un modo similar, el salpicadero del automóvil da la impresión de no moverse desde el punto de vista del conductor (¡al menos, no debiera darle esa impresión!), pero al igual que el resto del coche, se está moviendo desde el punto de vista del autoestopista. Éstos son ejemplos de propiedades tan básicas e intuitivas relativas al modo en que el mundo funciona, que a menudo nos pasan desapercibidas.

Sin embargo, la relatividad especial afirma que las diferencias existentes entre las observaciones de dos individuos como los del caso anterior son más sutiles y profundas. Formula una extraña afirmación según la cual los observadores que se encuentran en movimiento relativo uno con respecto al otro tendrán percepciones de la distancia y del tiempo distintas entre sí. Esto significa, como veremos más adelante, que relojes de pulsera idénticos llevados por dos individuos en movimiento relativo uno con respecto al otro moverán sus agujas a *distintas velocidades* y, por lo tanto, no coincidirán en cuanto al tiempo transcurrido entre unos sucesos determinados. La relatividad especial demuestra que esta afirmación no menoscaba la precisión de los relojes en cuestión, sino que se trata de una afirmación verdadera sobre el tiempo en sí mismo.

De un modo similar, los observadores que se encuentran en movimiento relativo y llevan cintas métricas idénticas no coincidirán en las longitudes de las distancias que midan. En este caso tampoco se trata de imprecisión en los aparatos de medición, ni de errores en el modo de utilizarlos. Los aparatos de medición más precisos del mundo confirman que el espacio y el tiempo —cuando se miden como distancias y duraciones— no son percibidos de forma idéntica en la experiencia de todas las personas. Según el modo preciso en que Einstein la formuló, la relatividad especial resuelve el conflicto entre nuestra intuición relativa al movimiento y las propiedades de la luz, pero hay que pagar un precio: los individuos que se están moviendo el uno con respecto al otro no coincidirán en sus observaciones del espacio, ni tampoco en las del tiempo.

Ha transcurrido casi un siglo desde que Einstein informara al mundo sobre su drástico descubrimiento y, sin embargo, la mayoría de nosotros sigue viendo el espacio y el tiempo en términos absolutos. La relatividad especial no está en nuestros huesos, no la sentimos. Sus implicaciones no son una parte fundamental de nuestra intuición. La razón por la que esto es así es bastante sencilla: los efectos de la relatividad especial dependen de la rapidez con que uno se mueva, y a las velocidades de los coches, los aviones o incluso las lanzaderas espaciales, estos efectos son minúsculos. Las diferencias en las percepciones del espacio y del tiempo entre individuos parados en tierra y aquellos que viajan en coches o aviones sí que se producen, pero son tan pequeñas que pasan desapercibidas. Sin embargo, si alguien hiciera un viaje en un vehículo espacial futurista que se moviera a una velocidad

igual a una fracción suficientemente grande de la velocidad de la luz, los efectos de la relatividad se harían totalmente evidentes, Desde luego, esto pertenece aún al ámbito de la ciencia ficción. No obstante, como comentaremos en otras secciones posteriores, algunos experimentos inteligentes permiten una clara y precisa observación de las propiedades relativas del espacio y el tiempo que predice la teoría de Einstein.

Para que nos hagamos una idea de las escalas a las que se mueve todo esto, imaginemos que estamos en el año 1970 y que existen unos coches grandes y rápidos. Slim, después de gastarse todos sus ahorros en un Trans Am nuevo, va con su hermano Jim a la pista de carreras local para realizar con el coche justamente el tipo de pruebas que prohíbe el vendedor. Después de acelerar el coche, Slim se lanza por la pista de una milla a una velocidad de 120 millas por hora, mientras Jim se queda inmóvil en la banquina y lo cronometra. Dado que desea una confirmación independiente, Slim utiliza también un cronómetro para determinar cuánto tarda su coche nuevo en recorrer ese tramo de la pista. Antes de publicarse la obra de Einstein, nadie habría puesto en cuestión que si Slim y Jim tienen ambos unos cronómetros que funcionan correctamente, ambos medirán intervalos de tiempo idénticos. Sin embargo, según la relatividad especial, mientras que Jim medirá un tiempo de 30 segundos, el cronómetro de Slim marcará un intervalo de tiempo de 29,99999999999952 segundos, *una diminuta porción de tiempo menos*. Por supuesto, esta diferencia es tan pequeña que sólo se puede detectar realizando una medición cuya precisión está más allá de la capacidad de los cronómetros manejados manualmente mediante la presión de un dedo, o de la de los sistemas de cronometraje de calidad olímpica, o incluso de la de los relojes atómicos más precisos. No es de extrañar que nuestras experiencias cotidianas no pongan de manifiesto el hecho de que el paso del tiempo depende de nuestro estado de movimiento.

Habrá una discrepancia similar en las medidas de longitud. Por ejemplo, en otra carrera de pruebas Jim utiliza un astuto truco para medir la longitud del coche nuevo de Slim: pone en marcha su cronómetro justo cuando llega delante de él la parte delantera del coche y lo detiene exactamente cuando pasa frente a él la parte de atrás. Puesto que Jim sabe que Slim va a una velocidad de 120 millas por hora, puede calcular la longitud del coche multiplicando la velocidad por el tiempo transcurrido en su cronómetro. Una vez más, antes de Einstein, nadie habría puesto en cuestión que la longitud que Jim mide de esta manera indirecta coincidiría exactamente con la que midió Slim con todo cuidado cuando el coche estaba parado en el local de exposición del vendedor. Pero, la relatividad especial afirma que, si Slim y Jim realizan mediciones precisas de este modo y Slim constata que la longitud del coche es, digamos, dieciséis pies, entonces la medición de Jim dirá que la longitud del coche es 15,99999999999974 pies, *un poquito menos*. Al igual que con la medición

del tiempo, se trata de una diferencia tan minúscula que los instrumentos corrientes no tienen la precisión necesaria para detectarla.

Aunque las diferencias sean extremadamente pequeñas, muestran un fallo fatal en el concepto comúnmente admitido de universalidad e inmutabilidad del espacio y del tiempo. A medida que la velocidad relativa de individuos tales como Slim y Jim aumenta, este fallo resulta cada vez más manifiesto. Para conseguir diferencias perceptibles, las velocidades deberían ser una fracción grande de la máxima velocidad posible —la de la luz— que según la teoría de Maxwell y las medidas experimentales llevadas a cabo resulta ser de alrededor de 300.000 kilómetros por segundo, o alrededor de 1.080 millones de kilómetros por hora. Esta velocidad basta para rodear la Tierra más de siete veces en un segundo. Si Slim, por ejemplo, en vez de viajar a 120 millas por hora, se desplazara a 580 millones de millas por hora (alrededor del 87 por ciento de la velocidad de la luz), las matemáticas de la relatividad especial predicen que la medición de la longitud del coche realizada por Jim daría como resultado alrededor de ocho pies, lo cual sería sustancialmente diferente de la medición de Slim (así como de las indicaciones del manual del usuario). De forma similar, el tiempo invertido en cruzar la pista de carreras según la medición de Jim resultaría el doble de largo que el tiempo medido por Slim.

Dado que estas velocidades tan enormes están muy lejos de ser alcanzables actualmente, los efectos de «dilatación del tiempo» y «contracción de Lorentz», que es como se llaman técnicamente estos fenómenos, resultan extremadamente pequeños en la vida cotidiana. Si viviéramos en un mundo en el que las cosas se desplazaran habitualmente a velocidades cercanas a la de la luz, estas propiedades del espacio y el tiempo serían tan completamente intuitivas —ya que las experimentaríamos constantemente— que no merecerían más discusión que el movimiento aparente, ya mencionado al principio de este capítulo, de los árboles que crecen al borde de la carretera. Pero, puesto que no vivimos en un mundo así, dichas propiedades nos resultan del todo extrañas. Como veremos más adelante, su comprensión y su aceptación requieren que sometamos nuestra visión del mundo a una remodelación completa.

El principio de relatividad

Hay dos estructuras sencillas, pero profundamente enraizadas, que constituyen los fundamentos de la relatividad especial. Como ya hemos mencionado anteriormente, una de ellas se refiere a las propiedades de la luz; la comentaremos más a fondo en la

próxima sección. La otra es más abstracta. No está relacionada con ninguna ley física específica, sino más bien con *todas* las leyes de la física, y se conoce como el *principio de relatividad*. El principio de relatividad se basa en un hecho simple: siempre que discutamos sobre rapidez o velocidad (la velocidad es la rapidez y su dirección de movimiento), debemos especificar con precisión quién o qué está realizando la medición. Se puede entender fácilmente el significado y la importancia de esta afirmación sin más que considerar la siguiente situación.

Imagine que George, que viste un traje espacial provisto de una pequeña luz roja intermitente, se encuentra flotando en la oscuridad absoluta del espacio completamente vacío, lejos de cualquier planeta, estrella o galaxia. Desde la perspectiva de George, él está completamente quieto, inmerso en la negrura uniforme y silenciosa del cosmos. Allá lejos en la distancia, George empieza a divisar una diminuta luz verde intermitente que parece acercarse cada vez más. Finalmente llega a estar tan cerca como para que George vea que esa luz está unida al traje espacial de otro habitante del espacio, Gracie, que va flotando lentamente. Al pasar, hace una señal con la mano, al igual que George, y se aleja en la distancia. Esta historia se puede contar igualmente desde el punto de vista de Gracie. Empieza del mismo modo, estando Gracie completamente sola en la inmensa negrura silenciosa del espacio exterior. A lo lejos en la distancia, Gracie ve una luz roja intermitente que parece acercarse cada vez más. Finalmente, llega a estar lo suficientemente cerca para que Gracie vea que está unida al traje espacial de otro ser, George, que va flotando lentamente. George saluda con la mano al pasar, igual que Gracie, y se aleja en la distancia.

Las dos historias describen la misma situación desde dos puntos de vista distintos e igualmente válidos. Cada uno de los dos observadores se siente inmóvil y percibe que el otro está en movimiento. Cada una de las perspectivas es comprensible y justificable. Puesto que hay simetría entre los dos habitantes del espacio, no hay, por razones muy evidentes, ningún modo de decir que una perspectiva es «correcta» y la otra «errónea». Cada perspectiva tiene el mismo derecho a ser la verdad.

Este ejemplo capta el significado del principio de relatividad: el concepto de movimiento es relativo. Podemos hablar sobre el movimiento de un objeto, pero sólo en relación o por comparación con otro. Por lo tanto, no tiene sentido la afirmación «George está viajando a 16 kilómetros por hora», si no hemos especificado ningún otro objeto como referencia. Sí que tiene sentido la afirmación «George está viajando a 16 kilómetros por hora al pasar por delante de Gracie», ya que ahora hemos especificado a Gracie como punto de referencia. Como muestra nuestro ejemplo, esta última afirmación es totalmente equivalente a «Gracie está viajando a 16 kilómetros por hora al pasar por delante de George (en dirección opuesta)».Dicho con otras palabras, no existe una noción «absoluta» de movimiento. El movimiento es relativo.

Un elemento clave de esta historia es que ni George ni Gracie son empujados en ningún sentido, ni se actúa sobre ellos de ninguna otra manera mediante fuerza o influencia alguna que pudiera perturbar su sereno estado de movimiento a velocidad constante, es decir, sin que ninguna fuerza actúe sobre dicha velocidad. Por lo tanto, una manera más precisa de decirlo es que *el movimiento libre de fuerzas* sólo tiene sentido por comparación con otros objetos. Esta aclaración es importante, porque si hay fuerzas implicadas, éstas producen cambios en la velocidad de los observadores —cambios en su velocidad y/o en la dirección del movimiento— y estos cambios se pueden percibir. Por ejemplo, si George llevara puesto un propulsor que actuara desde su espalda, desde luego sentiría que se estaba moviendo. Esta percepción es intrínseca. Si el propulsor está funcionando, George *sabe* que se está moviendo, aunque sus ojos estén cerrados y por lo tanto no pueda realizar comparaciones con otros objetos. Incluso sin tales comparaciones, ya no afirmaría que estaba inmóvil mientras que el resto del mundo se estaba moviendo junto a él. El movimiento a velocidad constante es relativo; pero no es así en el caso de un movimiento a velocidad no constante, es decir, un *movimiento acelerado*. (Volveremos a analizar esta afirmación en el próximo capítulo, cuando abordemos el movimiento acelerado y la teoría general de la relatividad de Einstein).

El situar estas historias en la oscuridad del espacio vacío ayuda a la comprensión si eliminamos objetos familiares tales como calles o edificios, a los que habitualmente, aunque de un modo injustificable, otorgamos el estatus especial de «inmóviles». Sin embargo, este mismo principio es aplicable a las instalaciones terrestres y es lo que, de hecho, se percibe corrientemente.[6] Por ejemplo, imaginemos que, después de quedarnos dormidos en un tren, despertamos justo cuando el tren pasa junto a otro situado en una vía adyacente paralela. Al mirar hacia la ventana, que está completamente bloqueada por el otro tren, lo cual nos impide ver cualquier otro objeto, puede que temporalmente no estemos seguros de si se está moviendo nuestro tren, o se está moviendo el otro, o ambos. Por supuesto, si nuestro tren se balancea o se mueve a empujones, o si el tren cambia de dirección describiendo una curva, podemos sentir que estamos moviéndonos. Pero si el movimiento es perfectamente uniforme, es decir, si la velocidad del tren permanece constante, observaremos un movimiento relativo entre los dos trenes sin poder decir con seguridad cuál de los dos está moviéndose.

Avancemos ahora un paso más. Imagínese que estamos en un tren como éste y bajamos las persianas de modo que las ventanas queden completamente cubiertas. Al no poder ver nada fuera de nuestro compartimento y suponiendo que el tren se desplaza a una velocidad absolutamente constante, no habrá modo de determinar nuestro estado de movimiento. El compartimento que nos rodea tendrá *precisamente* el mismo aspecto con independencia de que el tren esté parado en los raíles o

moviéndose a gran velocidad. Einstein formalizó esta idea, que se remonta en realidad a lo formulado por Galileo, afirmando que es imposible para cualquier viajero realizar dentro de este compartimento cerrado cualquier experimento que determine si el tren se está moviendo o no. Esto refleja de nuevo el principio de relatividad: dado que todo movimiento sobre el que no actúan fuerzas es relativo, sólo es perceptible por comparación con otros objetos o individuos sometidos asimismo a un movimiento sobre el que no actúa ninguna fuerza. No tenemos modo de determinar nada en relación con nuestro estado de movimiento salvo que hagamos alguna comparación directa o indirecta con objetos «exteriores». Sencillamente no existe el concepto de movimiento «absoluto» a velocidad constante; sólo las comparaciones tienen algún significado físico.

De hecho, Einstein constató que el principio de relatividad hace una afirmación aún más amplia: las leyes de la física —cualesquiera que sean— deben ser absolutamente idénticas para todos los observadores que estén sometidos a un movimiento de velocidad constante. Si George y Gracie no se limitan a estar flotando en el espacio, sino que están cada uno de ellos llevando a cabo el mismo conjunto de experimentos en sus respectivas estaciones espaciales flotantes, los resultados que obtengan serán idénticos. Una vez más, está perfectamente justificado que cada uno crea que su estación se encuentra en reposo, aunque las dos estaciones estén en movimiento relativo. Si todos sus aparatos son idénticos, no hay nada que diferencie los dos proyectos experimentales —son completamente simétricos—. Las leyes de la física que cada uno deduzca de los experimentos serán asimismo idénticas. Ni ellos ni sus experimentos pueden percibir el viaje a velocidad constante que están realizando, es decir, depender en modo alguno de este movimiento. Es este sencillo concepto el que establece una simetría completa entre ambos observadores; es el concepto que está incluido en el principio de relatividad. En breve utilizaremos este principio con un efecto profundo.

La velocidad de la luz

El segundo ingrediente clave de la relatividad especial tiene que ver con la luz y las propiedades de su movimiento. Contrariamente a nuestra afirmación de que no tiene sentido decir «George está viajando a una velocidad de 16 kilómetros por hora» sin especificar un punto de referencia para efectuar la comparación, casi un siglo de esfuerzos realizados por una serie de físicos experimentales ha demostrado que cualquier observador estará de acuerdo en que la luz viaja a unos 300.000 kilómetros

por segundo *sin tener en cuenta las mediciones por comparación*.

Este hecho ha necesitado que se produzca una revolución en muestro modo de entender el universo. En primer lugar, vamos a conseguir entender su significado contrastándolo con afirmaciones similares aplicadas a objetos más corrientes. Imaginemos que hace un día soleado y agradable, y que sale usted a jugar a la pelota con una amiga. Durante un rato ambos juegan a lanzarse la pelota pausadamente, digamos que a una velocidad de 6 metros por segundo. De repente estalla una inesperada tormenta eléctrica y los dos se ven obligados a echar a correr buscando refugio donde guarecerse. Cuando la tormenta ha pasado los dos se reúnen de nuevo para continuar jugando, pero entonces usted nota que algo ha cambiado. El cabello de su amiga se ha puesto alborotado y erizado, y sus ojos se han vuelto violentos y enloquecidos. Cuando mira su mano, se queda estupefacto al ver que no se levanta para lanzar una pelota de béisbol, sino que está a punto de arrojarle una granada de mano. Como es lógico, usted siente que su entusiasmo por seguir jugando a la pelota disminuye sustancialmente; lo que usted hace es echar a correr. Cuando su compañera lanza la granada, ésta vuela hacia usted, pero dado que usted va corriendo, la velocidad a la que se le acerca la granada será de menos de 6 metros por segundo. De hecho, la experiencia nos dice que si usted puede correr a, digamos, 4 metros por segundo, entonces la granada de mano se acercará a (6–4=) 2 metros por segundo. Por poner otro ejemplo, si estamos en la montaña y una avalancha de nieve cae hacia nosotros, nuestra reacción es damos la vuelta y correr porque esto hará que disminuya la velocidad a la que la nieve se acerca a nosotros —y esto, en general, es beneficioso —. Una vez más, un individuo que esté inmóvil percibe que la nieve se aproxima a una velocidad mayor que la que percibiría alguien que se retira corriendo.

Ahora comparemos estas observaciones básicas sobre pelotas de béisbol, granadas y avalanchas con las observaciones relacionadas con la luz. Para que las comparaciones sean más ajustadas, pensemos que un haz de luz está formado por diminutos «paquetes» o «haces» llamados fotones (una característica de la luz que comentaremos más a fondo en el capítulo 4). Cuando hacemos relampaguear la luz de un flash o emitimos un rayo láser, estamos en efecto lanzando un raudal de fotones en la dirección hacia la que apuntemos con el aparato. Como hicimos con las granadas o las avalanchas, pensemos cómo percibe el movimiento de un fotón alguien que está en movimiento. Imagine que su enloquecida amiga ha cambiado la granada por un potente láser. Si dispara el láser hacia usted —y usted dispone del equipo de medición apropiado— verá que la velocidad a la que se acercan los fotones del rayo láser es de aproximadamente 300.000 kilómetros por segundo. Pero ¿qué sucede si usted huye corriendo, como hizo ante la perspectiva de jugar a la pelota con una granada de mano? ¿Qué velocidad medirá usted ahora para los fotones que se acercan? Para que la situación sea más impresionante, suponga que puede hacerse transportar en la nave

espacial *Enterprise* y escaparse de su amiga a, por ejemplo, 40.000 kilómetros por segundo. Siguiendo el razonamiento basado en la concepción del mundo tradicional de Newton, dado que usted ahora se mueve a una cierta velocidad, es de esperar que la velocidad de los fotones que se acercan resulte *más lenta* en su medición. Concretamente, es de suponer que los fotones se acerquen a (300.000 kilómetros por segundo – 40.000 kilómetros por segundo =) 260.000 kilómetros por segundo.

Una evidencia cada vez mayor obtenida a partir de distintos experimentos que se remontan hasta la década de 1880, así como un análisis y una interpretación minuciosos de la teoría electromagnética de la luz de Maxwell, fueron convenciendo poco a poco a la comunidad científica de que, en realidad, *no es esto* lo que usted vería. *Aunque usted esté alejándose, seguirá midiendo que los fotones se acercan a una velocidad de* 300.000 *kilómetros por segundo, ni un kilómetro menos*. Aunque al principio esto suene completamente ridículo, a diferencia de lo que sucede cuando se corre escapando de una pelota de béisbol, una granada o una avalancha, la velocidad de aproximación de los fotones es siempre 300.000 kilómetros por segundo. Lo mismo sucedería si corriésemos hacia los fotones que se nos acercan o los persiguiéramos —su velocidad de aproximación o de retroceso es totalmente invariable; siempre sucede que se desplazan a 300.000 kilómetros por segundo—. Independientemente del movimiento relativo que tenga lugar entre la fuente de fotones y el observador, la velocidad de la luz es siempre la misma.

Las limitaciones tecnológicas son tales que los «experimentos» con la luz, como el que hemos descrito, no pueden hoy por hoy realizarse. Sin embargo, se pueden realizar experimentos comparables. Por ejemplo, en 1913, el físico holandés Willem de Sitter sugirió que las estrellas binarias de rápido movimiento (dos estrellas que orbitan una en torno de la otra) se podían utilizar para medir el efecto de una fuente en movimiento a la velocidad de la luz. Varios experimentos de este tipo realizados durante las últimas ocho décadas han verificado que la velocidad de la luz procedente de una estrella en movimiento es *igual* que la de la luz que procede de una estrella inmóvil –300.000 kilómetros por segundo— con la gran precisión de unos aparatos de medición cada vez más perfeccionados. Además, durante el último siglo se llevaron a cabo una gran cantidad de experimentos minuciosos —experimentos que medían directamente la velocidad de la luz en distintas circunstancias y también comprobaban muchas de las consecuencias derivadas de esta característica de la luz, como se ha comentado brevemente— y todos confirmaron que la velocidad de la luz es constante.

Si usted considera que esta propiedad de la luz es difícil de digerir, sepa que no es el único. Al final del siglo, algunos físicos hicieron un gran esfuerzo por refutarla. No lo consiguieron. En cambio, Einstein aceptó el valor constante de la velocidad de la luz, ya que ahí estaba la respuesta a la contradicción que le había tenido preocupado

desde que era un adolescente. Da igual a qué velocidad persigamos un rayo de luz; siempre se alejará de nosotros a la velocidad de la luz. Es imposible hacer que la velocidad aparente con que la luz se aleja sea ni siquiera una pizca menor que 300.000 kilómetros por segundo, y mucho menos frenarla hasta el punto de que parezca quedarse inmóvil. Caso cerrado. Pero este triunfo sobre la contradicción no fue tan sólo una pequeña victoria. Einstein constató que la constancia de la velocidad de la luz anunciaba el declive de la física de Newton.

La verdad y sus consecuencias

La velocidad nos da la medida de la distancia a la que puede desplazarse un objeto en un intervalo de una duración determinada de tiempo. Si viajamos en un coche que va a 105 kilómetros por hora, esto significa, por supuesto, que recorreremos 105 kilómetros si nos mantenemos en este estado de movimiento durante una hora. Dicho de esta manera, la velocidad es un concepto bastante corriente, y el lector puede asombrarse de que hayamos organizado tanto lío con la velocidad de las pelotas de béisbol, las bolas de nieve y los fotones. Sin embargo, observemos que *distancia* es un concepto relativo al espacio, concretamente una medida de la cantidad de espacio lineal que hay entre dos puntos. Observemos también que *duración* es un concepto relativo al tiempo —cuánto tiempo transcurre entre dos sucesos—. Por consiguiente, la velocidad está íntimamente ligada a nuestras nociones de espacio y tiempo. Cuando definimos los conceptos de este modo, vemos que cualquier hecho experimental que desafíe nuestro concepto habitual de velocidad, como es el caso de la constancia de la velocidad de la luz, es potencialmente un desafío a nuestros conceptos habituales de espacio y tiempo. A esto se debe que esa extraña característica de la velocidad de la luz haya merecido un examen profundo y minucioso, un examen que realizó Einstein con profundidad y que le llevó a unas conclusiones realmente notables.

El efecto sobre el tiempo: primera parte

Con un esfuerzo mínimo, podemos utilizar la constancia de la velocidad de la luz para demostrar que el concepto vulgar y cotidiano del tiempo es totalmente

equivocado. Imaginemos que los presidentes de dos naciones en guerra, sentados en los extremos opuestos de una larga mesa de negociaciones, acaban de cerrar un acuerdo para el alto el fuego, pero ninguno de ellos quiere ser el primero en firmar el acuerdo. Entonces, al secretario general de las Naciones Unidas se le ocurre una solución brillante. Se colocará una bombilla eléctrica, inicialmente apagada, en una posición equidistante de los dos presidentes. Cuando se encienda, la luz que emita alcanzará simultáneamente a los dos presidentes, ya que ambos se encuentran a la misma distancia de la bombilla. Los dos presidentes se ponen de acuerdo en firmar una copia del acuerdo cuando vean la luz. Este plan se pone en práctica y el acuerdo se firma con la aprobación de ambas partes.

Radiante por el éxito conseguido, el secretario general utiliza el mismo procedimiento con otras dos naciones beligerantes que también han llegado a un acuerdo de paz. La única diferencia es que los presidentes que participan en esta negociación están sentados en los extremos opuestos de una mesa colocada dentro de un tren que se desplaza con una velocidad constante. Como corresponde, el presidente de Avancilandia se sienta mirando hacia delante en la dirección de avance del tren, mientras que el presidente de Retrocesilandia se sienta mirando en sentido opuesto. Conociendo el hecho de que las leyes de la física se comportan exactamente del mismo modo con independencia del estado de movimiento, siempre que este movimiento sea invariable, el secretario general no tiene en cuenta esta diferencia y lleva a cabo la ceremonia de firmar al encenderse la luz igual que en el caso anterior. Ambos presidentes firman el acuerdo y, junto con todos sus asesores, celebran el fin de las hostilidades.

En ese preciso momento, llega la noticia de que se han iniciado combates entre la gente de ambos países que habían estado observando la ceremonia de la firma desde el andén situado junto al tren en movimiento. Todos los participantes en la negociación se quedan aturdidos al oír que la razón para la nueva ruptura de hostilidades es la queja de los de Avancilandia, que afirman haber sido engañados, ya que su presidente había firmado el acuerdo *antes* que el presidente de Retrocesilandia. Dado que todos los que se encuentran en el tren —de ambos bandos — coinciden en que el acuerdo se firmó simultáneamente, ¿cómo puede ser que los observadores que se encontraban en el exterior presenciando la ceremonia opinen otra cosa?

Veamos más detalladamente cuál es el punto de vista de un observador situado en el andén. Inicialmente la bombilla que está dentro del tren se encuentra apagada y luego, en un momento determinado, se enciende, enviando haces de luz que se desplazan hacia los dos presidentes. Desde el punto de vista de una persona que está en el andén, el presidente de Avancilandia se desplaza hacia la luz emitida, mientras que el presidente de Retrocesilandia se retira de dicha luz. Esto significa, para los

observadores del andén, que el haz de luz, para llegar hasta el presidente de Avancilandia, que se desplaza hacia esa luz que se acerca, no tiene que viajar tanta distancia como para llegar al presidente de Retrocesilandia, que se está alejando de dicha luz. No se trata aquí de una afirmación que afecte a la *velocidad* de la luz cuando se desplaza hacia los dos presidentes —ya hemos indicado que, independientemente del estado de movimiento de la fuente o del observador, la velocidad de la luz es siempre la misma—. En cambio, lo que estamos diciendo es sólo cuán *lejos*, desde el lugar que ocupaban los observadores del andén, tenía que desplazarse el rayo inicial de luz para llegar a cada uno de los presidentes. Dado que esta distancia era menor para el presidente de Avancilandia que para el presidente de Retrocesilandia, y siendo la velocidad de la luz igual en cualquier sentido, la luz llegaría primero al presidente de Avancilandia. Ésta es la razón por la que los de Avancilandia decían que les habían engañado.

Cuando la CNN difunde las declaraciones de los testigos, el secretario general, los dos presidentes y todos los asesores presentes no pueden dar crédito a sus oídos. Todos están de acuerdo en que la bombilla estaba sujeta con firmeza, exactamente en el punto medio entre los dos presidentes y que, por consiguiente, sin lugar a dudas, la luz que emitía recorría la *misma* distancia para llegar a cada uno de ellos. Dado que la velocidad de la luz emitida hacia la derecha y hacia la izquierda es la misma, creen, y así lo habían visto, que la luz evidentemente llegaba de forma simultánea a cada presidente.

¿Quién tiene razón, los que están en el interior del tren o los del exterior? Las observaciones de cada grupo y las explicaciones que las apoyan son impecables. La respuesta es que *todos* tienen razón. Al igual que en el caso de nuestros dos habitantes del espacio, George y Gracie, cada uno de los puntos de vista tiene el mismo derecho a ser considerado verdadero. El único problema sutil que se plantea es que las verdades respectivas parecen ser contradictorias. Además, está en juego una importante cuestión política: ¿firmaron los presidentes el acuerdo simultáneamente? Las observaciones y los razonamientos que se han expuesto hasta ahora, nos llevan irremediablemente a la conclusión de que *según aquellos que se encontraban en el tren, sí firmaron simultáneamente, mientras que según los que estaban en el andén, no se hizo así*. Dicho de otro modo, cosas que son simultáneas desde el punto de vista de algunos observadores, no lo serán desde el punto de vista de otros, si ambos grupos se encuentran en movimiento relativo unos con respecto a otros.

Se trata de una conclusión asombrosa. Este descubrimiento es una de las ideas más profundas sobre la naturaleza del mundo real que se haya logrado jamás. No obstante, si mucho después de haber dejado este libro, lo único que recuerda el lector es el malogrado intento de distensión entre los países contendientes, habrá retenido la

esencia del descubrimiento de Einstein. Sin profundizar en las matemáticas y sin seguir una complicada cadena lógica, esta característica del tiempo, totalmente inesperada, se deduce directamente del valor constante de la velocidad de la luz, tal como ejemplifica la situación. Obsérvese que si la velocidad de la luz no fuera constante, sino que se comportara de acuerdo con nuestra intuición, que se basa en lo que sucede con pelotas de béisbol o bolas de nieve que se mueven lentamente, los observadores del andén coincidirían en sus apreciaciones con los del tren. Un observador del andén afirmaría además que los fotones han de desplazarse recorriendo una mayor distancia para llegar hasta el presidente de Retrocesilandia que para llegar hasta el presidente de Avancilandia. Sin embargo, la intuición habitual diría que la luz que se acerca hacia el presidente de Retrocesilandia se tendría que desplazar más rápidamente, pues habría recibido un «empujón» del tren que se mueve hacia delante. De un modo similar, estos observadores verían que la luz que se acerca al presidente de Avancilandia se movía más lentamente, pues resultaría «arrastrada hacia atrás» por el movimiento del tren. Si se tuvieran que tener en cuenta estos efectos (erróneos), los observadores del andén verían que los haces de luz alcanzaban simultáneamente a los dos presidentes. Sin embargo, en el mundo real la luz ni se acelera ni se frena, y tampoco puede ser empujada para alcanzar una velocidad mayor, ni arrastrada a una velocidad menor. Por consiguiente, los observadores del andén dicen algo justificable al afirmar que la luz había alcanzado primero al presidente de Avancilandia.

El carácter constante de la velocidad de la luz exige que abandonemos la vieja noción de que la simultaneidad es un concepto universal con el que cualquiera está de acuerdo, independientemente de su estado de movimiento. No existe un reloj universal que esté diseñado previamente para marcar con ecuanimidad segundos idénticos aquí en la Tierra y en Marte o Júpiter, o en la galaxia de Andrómeda y en todos y cada uno de los recovecos del cosmos. Por el contrario, los observadores que se encuentren en movimiento relativo unos con respecto a otros, no coincidirán en percibir que los sucesos simultáneos se produzcan al mismo tiempo. Una vez más, la razón por la que esta conclusión —una característica auténtica del mundo en que vivimos— resulta tan extraña es que sus efectos son extremadamente pequeños cuando las velocidades implicadas son las que observamos corrientemente en la experiencia cotidiana. Si la mesa de negociaciones tuviera una longitud de unos 30 metros y el tren se desplazara a 16 kilómetros por hora, los observadores del andén «verían» que la luz alcanzaba al presidente de Avancilandia alrededor de mil billonésimas de segundo antes de alcanzar al presidente de Retrocesilandia. Aunque esto supone una diferencia real, es tan insignificante que no la pueden detectar los sentidos humanos de forma directa. Si el tren se moviera muchísimo más rápido, por ejemplo a unos mil millones de kilómetros por hora, desde el punto de vista de

alguien que estuviera en el andén la luz tardaría en alcanzar al presidente de Retrocesilandia aproximadamente 20 veces lo que tardaría en alcanzar al presidente de Avancilandia. A altas velocidades, los asombrosos efectos de la relatividad especial se reforzarían cada vez más.

El efecto sobre el tiempo: segunda parte

Es difícil dar una definición abstracta del tiempo —los intentos de hacerla terminan a menudo dando vueltas hasta llegar a utilizar la propia palabra «tiempo», o realizan contorsiones lingüísticas para evitar hacerlo—. En vez de ir por este camino, podemos adoptar un punto de vista pragmático y definir el tiempo como aquello que miden los relojes. Por supuesto, está claro que esto desplaza el peso de la definición hacia la palabra «reloj»; de una forma en cierto modo poco rigurosa, podríamos decir que un reloj es un aparato que realiza ciclos de movimiento perfectamente regulares. Mediremos el tiempo contando el número de ciclos que realiza nuestro reloj. Un reloj habitual, como podría ser uno de pulsera, cumple esta definición; tiene unas manillas que mueve en ciclos regulares de movimiento y de hecho medimos el tiempo transcurrido contando el número de ciclos (o fracciones de ellos) que describen las manillas entre dos sucesos determinados.

Desde luego, el significado de la expresión «ciclos de movimiento perfectamente regulares» incluye implícitamente el concepto de tiempo, ya que el término «regular» se refiere a duraciones iguales de tiempo que transcurren en cada ciclo. Desde un punto de partida práctico, realizamos esto construyendo relojes que se basan en sencillos componentes físicos de los que, por razones fundamentales, esperamos la ejecución de evoluciones repetitivas cíclicas que no cambian en absoluto de un ciclo al siguiente. Los relojes del abuelo, dotados de péndulos que oscilan una y otra vez, y los relojes atómicos, basados en procesos atómicos repetitivos, constituyen ejemplos sencillos.

Nuestro objetivo es comprender cómo afecta el movimiento al paso del tiempo y, —dado que hemos definido el tiempo de una forma operativa refiriéndonos a los relojes—, podemos trasladar nuestra pregunta a la cuestión de cómo el movimiento afecta al «tictac» de los relojes. Es crucial insistir desde el principio en que nuestra discusión no tiene que ver con el modo en que los elementos mecánicos de un reloj concreto responden al efecto de agitarlos o sacudirlos que podría derivarse de un movimiento desigual. De hecho, consideraremos sólo el tipo de movimiento más sencillo y más sereno —un movimiento con una velocidad del todo constante— y,

por consiguiente, no habrá absolutamente ninguna agitación ni zarandeo. En vez de esto, estamos interesados en la cuestión universal relativa al modo en que el movimiento afecta al paso del tiempo y, en consecuencia, cómo afecta fundamentalmente al funcionamiento de todos y cada uno de los relojes, sin tener en cuenta su diseño o construcción particular.

Con este fin, presentamos el reloj conceptualmente más sencillo del mundo (aunque sea el menos práctico). Se conoce como «reloj de luz» y está formado por dos pequeños espejos montados el uno frente al otro sobre un brazo, y entre ellos hay un único fotón de luz que salta del uno al otro (véase la Figura 2.1). Si los espejos están separados unos quince centímetros, el fotón tardará alrededor de una milmillonésima de segundo en realizar un viaje de ida y vuelta. Se puede considerar que el tictac de un reloj de luz se produce cada vez que el fotón hace un viaje de ida y vuelta completo. Mil millones de tictacs indicarían que ha transcurrido un segundo.

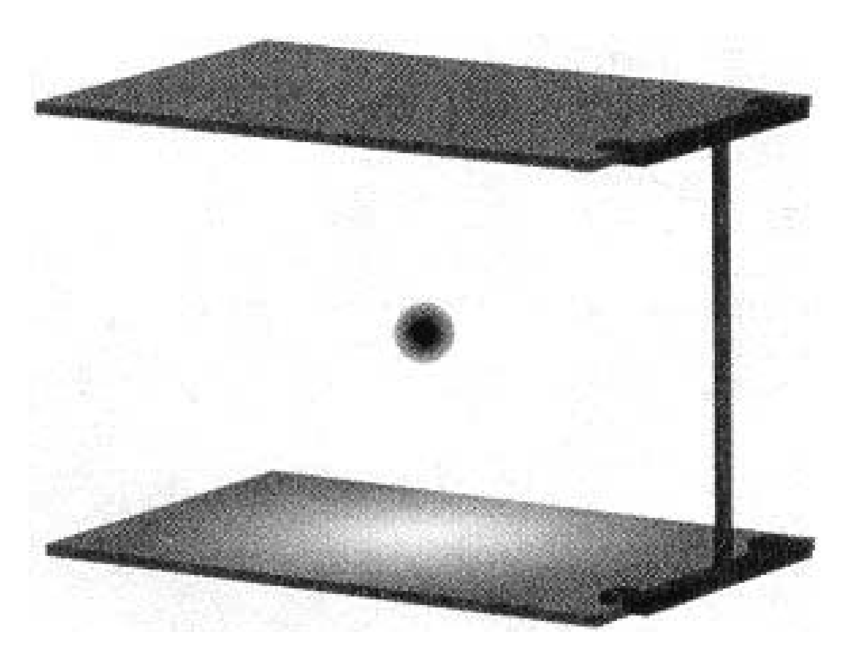


Figura 2.1 Un reloj de luz consiste en dos espejos paralelos y un fotón que salta rebotando sobre dichos espejos. El reloj hace «tic» cada vez que el fotón realiza un viaje completo de ida y vuelta.

Podemos utilizar el reloj de luz como un cronómetro para medir el tiempo transcurrido entre dos sucesos: basta con contar el número de tictacs que se produce durante el período que se desea medir y multiplicarlos por el tiempo correspondiente a un tictac. Por ejemplo, si lo que estamos cronometrando es una carrera de caballos y contamos 55.000 millones de viajes de ida y vuelta del fotón entre el comienzo y el final de la carrera, podemos concluir que ésta ha durado 55 segundos.

La razón por la que usamos el reloj de luz en esta explicación es que su sencillez mecánica elimina detalles extraños y, por consiguiente, nos proporciona la visión más clara posible del modo en que el movimiento afecta al paso del tiempo. Para ver esto, imaginemos que observamos tranquilamente el paso del tiempo mirando cómo

funciona un reloj de luz situado en una mesa que tenemos a nuestro lado. Entonces, de repente, un segundo reloj de luz empieza a deslizarse por la superficie de la mesa, moviéndose a una velocidad constante (véase la Figura 2.2). La pregunta que nos planteamos es si el reloj de luz que está en movimiento hará el tictac a la misma velocidad que el reloj de luz que está inmóvil.

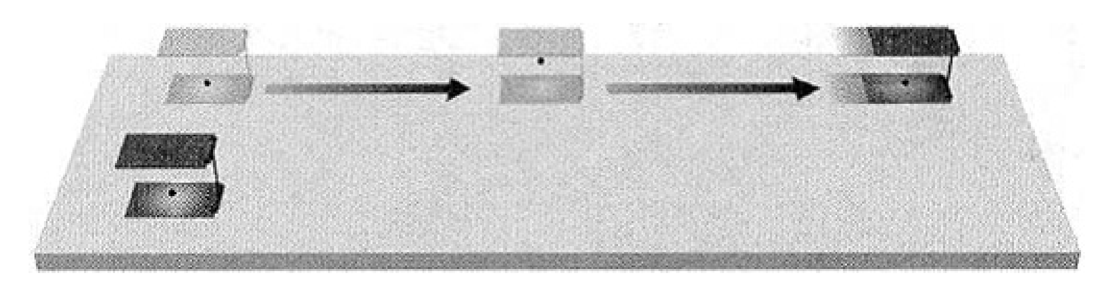


Figura 2.2 En primer plano un reloj de luz inmóvil, mientras un segundo reloj se desliza a velocidad constante.

Para responder a esta pregunta, observemos, desde nuestra perspectiva, el camino que ha de recorrer el fotón del reloj que se desliza, para realizar un tictac completo. El fotón parte de la base del reloj que se desliza, como se ve en la Figura 2.2, y primero se desplaza hasta el espejo superior. Dado que desde nuestro punto de vista, el reloj se mueve, el fotón debe desplazarse con un cierto ángulo de inclinación, como se muestra en la Figura 2.3 Si el fotón no viajara siguiendo esta trayectoria, no llegaría hasta el espejo superior y se perdería volando en el espacio. Como el reloj que se desliza tiene todo el derecho a afirmar que él está inmóvil y todo lo demás está en movimiento, sabemos que el fotón chocará contra el espejo superior y, por lo tanto, que la trayectoria que hemos trazado es correcta. El fotón rebota en el espejo superior y vuelve a desplazarse por una trayectoria oblicua para chocar contra el espejo inferior, y así el reloj que se desliza hace un tictac. La cuestión, sencilla pero esencial, es que la doble trayectoria en diagonal por la que vemos que atraviesa el fotón es *más larga* que la trayectoria directa hacia arriba y hacia abajo que recorre el fotón del reloj inmóvil; además de recorrer la distancia hacia arriba y hacia abajo, el fotón del reloj que se desliza también debe moverse hacia la derecha, desde nuestra perspectiva. Lo que es más, el hecho de que la velocidad de la luz sea constante nos dice que el fotón del reloj que se desliza viaja exactamente a la misma velocidad que el fotón del reloj inmóvil. Pero, dado que ha de recorrer una mayor distancia para realizar un tictac completo, hará tictac con una *menor frecuencia*. Este sencillo argumento indica que el reloj de luz que está en movimiento hace tictac más lentamente que el reloj de luz que está quieto. Entonces, puesto que hemos acordado que el número de tictacs refleja directamente cuánto tiempo ha transcurrido, vemos que el paso del tiempo se ha vuelto más lento en el reloj que está en movimiento.

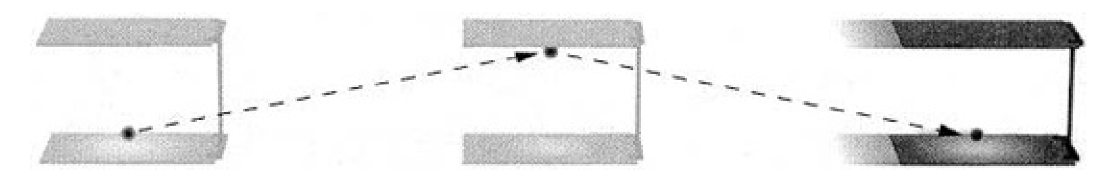


Figura 2.3 Desde nuestra perspectiva, el fotón en el reloj que se desliza viaja en un camino diagonal.

El lector podría preguntarse si esto refleja solamente alguna característica especial de los relojes de luz y no sería aplicable a los relojes del abuelo o a los *Rolex*. ¿También se volvería más lento el tiempo que miden estos relojes que nos resultan más familiares? La respuesta es un rotundo sí, como se puede ver aplicando el principio de relatividad. Atemos un reloj Rolex a la parte superior de cada uno de nuestros relojes de luz y volvamos a realizar el experimento anterior. Como ya se ha comentado, un reloj de luz inmóvil y el Rolex que lleva atado miden unas duraciones idénticas en el tiempo, produciéndose mil millones de tictacs en el reloj de luz por cada segundo de tiempo que marca el Rolex. Pero ¿qué sucede con el reloj de luz que está en movimiento y el Rolex que lleva atado? ¿Se vuelve más lenta la velocidad a la que se producen los tictacs en el Rolex que está en movimiento, de tal forma que éste permanece sincronizado con el reloj de luz al que está atado? Bien, pues para forzar aún más la situación, supongamos que la combinación del reloj de luz y el Rolex se mueve porque está sujeta con tornillos al suelo de un compartimento de tren sin ventanas que se desliza sobre raíles perfectamente rectos y lisos a una velocidad constante. Por el principio de relatividad, no hay manera de que un observador situado en este tren detecte ningún efecto de su movimiento. Sin embargo, si el reloj de luz y el Rolex dejaran de estar sincronizados, el efecto sí que se notaría. Por lo tanto, el reloj de luz que está en movimiento y el Rolex que va atado a él *deben* seguir midiendo duraciones de tiempo iguales; el Rolex *debe* reducir su velocidad exactamente del mismo modo en que lo hace el reloj de luz. Independientemente de la marca, el modelo y la manera en que estén construidos, los relojes que se están moviendo de una manera relativa el uno con respecto al otro registran el paso del tiempo a distintas velocidades.

Esta discusión sobre el reloj de luz deja claro también que la diferencia exacta de tiempo entre el reloj inmóvil y el que se mueve depende de cuánto más mida la distancia que ha de recorrer el fotón del reloj que se desliza para realizar completamente cada viaje de ida y vuelta. A su vez, esto depende de la velocidad a la que se mueva el reloj que se desliza; desde el punto de vista de un observador inmóvil, cuanto más rápido se deslice el reloj, mayor será la distancia que ha de recorrer el fotón hacia la derecha. Como conclusión diremos que, en comparación con un reloj inmóvil, la velocidad de los tictacs del reloj que se desliza se vuelve cada vez más lenta a medida que el reloj se desliza cada vez más rápido.[7]

Con el fin de hacerse una idea de la escala, observe que el fotón realiza un viaje de ida y vuelta en alrededor de milmillonésima de segundo. Para que el reloj sea capaz de recorrer una distancia apreciable en el tiempo de un tictac, dicho reloj ha de estar desplazándose a una velocidad enorme, es decir, a una velocidad cuyo valor sea una fracción significativa de la velocidad de la luz. Si se desplaza a velocidades más habituales, como unos 16 kilómetros por hora, la distancia que puede recorrer hacia la derecha antes de realizar un tictac completo es minúscula: alrededor de cuarenta y cinco cienmillonésimas de centímetro. La distancia añadida que el fotón debe recorrer en el reloj que se desliza es diminuta y también es insignificante el efecto correspondiente en la velocidad a la que se producen los tictacs en este reloj en movimiento. Además, de nuevo, por el principio de relatividad esto es cierto para todos los relojes, es decir, para el tiempo en general. Es la razón por la que los seres como nosotros, que nos desplazamos relativamente unos con respecto a otros a unas velocidades tan lentas, normalmente no somos conscientes de las distorsiones que se producen en el paso del tiempo. Los efectos, aunque están presentes con toda seguridad, son increíblemente pequeños. Por otra parte, si pudiéramos agarrar el reloj que se desliza y movernos con él, por ejemplo, a tres cuartas partes de la velocidad de la luz, las fórmulas de la relatividad especial se podrían utilizar para demostrar que unos observadores inmóviles verían cómo nuestro reloj en movimiento hace tictac a alrededor de dos tercios de la velocidad del de ellos. Un efecto significativo, desde luego.

Vivir a la carrera

Hemos visto que el carácter constante de la velocidad de la luz implica que un reloj de luz en movimiento hace tictac más lentamente que un reloj de luz que esté inmóvil. Además, por el principio de relatividad, esto ha de ser cierto, no sólo para los relojes de luz, sino también para cualquier reloj, y ha de ser cierto en general para el tiempo. El tiempo transcurre más lentamente para un individuo en movimiento que para un individuo que se encuentre en reposo. Si el razonamiento absolutamente sencillo que nos ha llevado a esta conclusión es correcto, entonces, ¿no tendríamos que, por ejemplo, poder vivir más tiempo estando en movimiento que permaneciendo inmóviles? Después de todo, si el tiempo transcurre más lentamente para un individuo en movimiento que para uno que está inmóvil, esta disparidad debería ser aplicable, no sólo al tiempo que miden los relojes, sino también al tiempo que se puede medir mediante los latidos del corazón y la decadencia de algunas partes del

cuerpo. Esto es así, y ya se ha confirmado directamente, no para la esperanza de vida de los humanos, sino para ciertas partículas del microespacio: los muones. No obstante, existe una pega importante que nos impide proclamar el hallazgo de una nueva fuente de juventud.

Cuando se encuentran en reposo en el laboratorio, los muones se desintegran mediante un proceso muy semejante a la desintegración radiactiva, en un promedio de tiempo de alrededor de dos millonésimas de segundo. Esta desintegración es un hecho experimental apoyado por una cantidad enorme de pruebas. Es como si un muon pasara su vida con un revólver apuntando a su cabeza; cuando cumple la edad de dos millonésimas de segundo, pulsa el gatillo y explota descomponiéndose en electrones y neutrinos. Pero, si estos muones no están en reposo en el laboratorio, sino que viajan a través de un aparato denominado acelerador de partículas que los impulsa hasta que casi alcanzan la velocidad de la luz, el promedio de su esperanza de vida medido por los científicos en el laboratorio aumenta drásticamente. Esto *realmente* sucede. A una velocidad de 298.168 kilómetros por segundo (alrededor del 99,5 por 100 de la velocidad de la luz), el tiempo de vida del muon se multiplica aproximadamente por diez. La explicación de esto, de acuerdo con la relatividad especial, es que los «relojes de pulsera» que llevan los muones hacen tictac mucho más lentamente que los relojes del laboratorio, por lo que mucho después de que los relojes del laboratorio digan que los muones tendrían que haber pulsado sus gatillos y explotado, los relojes de estos muones de movimiento rápido aún no han llegado a marcar su última hora. Ésta es una demostración muy directa y dramática del efecto que produce el movimiento en el paso del tiempo. Si las personas pudieran moverse tan rápido como estos muones, su esperanza de vida aumentaría también multiplicándose por el mismo factor, con lo que, en vez de vivir setenta años, vivirían setecientos años.[8]

Ahora viene el truco. Aunque los observadores del laboratorio ven que los muones que se mueven rápidamente tienen una vida mucho más larga que la de sus hermanos inmóviles, esto se debe a que *el tiempo transcurre más lentamente* para los muones que están en movimiento. Esta reducción de la velocidad en el paso del tiempo no sólo se produce en los relojes que llevan los muones, sino también en todas las actividades que éstos realicen. Por ejemplo, si un muon inmóvil puede leer cien libros durante su corto período de existencia, su pariente de movimiento rápido sólo podrá leer esos mismos cien libros, porque aunque parezca que vive durante más tiempo que el muoninmóvil, su velocidad de lectura —al igual que todo lo demás en su vida— también se vuelve más lenta. Desde la perspectiva de los experimentos de laboratorio, es como si el muon en movimiento estuviera viviendo su vida a cámara lenta; desde este punto de vista, el muon en movimiento vivirá más tiempo que el muon inmóvil, pero la «cantidad de vida» que cualquier muonexperimenta es

exactamente la misma. En el caso de las personas que están en movimiento rápido, por supuesto, es idéntica la conclusión a la que se llega, siendo la esperanza de vida de varios siglos. Desde la perspectiva *de estas personas*, se trata de lo habitual con respecto a la vida. Desde nuestra perspectiva, están viviendo la vida con un movimiento hiperlento y, por consiguiente, uno de sus ciclos de vida normales tarda en producirse una cantidad enorme de *nuestro* tiempo.

Entonces, ¿quién se está moviendo?

La relatividad del movimiento es, por una parte, la clave para comprender la teoría de Einstein, y al mismo tiempo una fuente potencial de confusión. Probablemente el lector se ha dado cuenta de que invirtiendo las perspectivas se invierten también los papeles entre los muones «en movimiento», cuyos relojes, como ya hemos dicho, funcionan lentamente, y los muones «inmóviles». Del mismo modo que George y Gracie tenían el mismo derecho a afirmar que estaban inmóviles y que era el otro el que se movía, de los muones que hemos considerado en movimiento se puede afirmar con toda la razón que, desde su propio punto de vista, no se están moviendo y que son los muones inmóviles los que se mueven en sentido contrario. Los argumentos que se han aportado pueden aplicarse asimismo correctamente desde esta perspectiva, y nos conducirían a la conclusión aparentemente contraria de que los relojes de los muones que habíamos bautizado como inmóviles estaban atrasándose en comparación con los de los muones que habíamos considerado como muones en movimiento.

Anteriormente nos hemos encontrado con una situación, la ceremonia de la firma con la bombilla eléctrica en la mesa, en la que los diferentes puntos de vista llevaban a resultados que parecían chocar entre sí completamente. En aquel caso, el razonamiento básico de la relatividad especial nos obligaba a descartar la tan arraigada idea de que todas las personas, independientemente de su estado de movimiento, coinciden en saber cuáles son los acontecimientos que suceden al mismo tiempo. Pero, la incongruencia que vemos ahora parece más grave. ¿Cómo pueden dos observadores decir que es el reloj del otro el que se atrasa? Lo que es más serio aún, las perspectivas diferentes, pero igualmente válidas, de los muones parecen llevamos a la conclusión de que cada grupo afirmará, tajantemente pero con tristeza, que ellos serán los primeros en morir. Estamos descubriendo que el mundo puede tener ciertas características inesperadamente extrañas, pero sería de esperar que no entrara en el terreno del absurdo lógico. Entonces, ¿qué es lo que está pasando?

Como sucede con todas las paradojas aparentes que surgen a partir de la relatividad especial, examinándolos más a fondo estos dilemas lógicos se resuelven revelando nuevos aspectos relativos al funcionamiento del universo. Para no seguir dando un carácter antropomórfico a las cosas, dejemos el asunto de los muones y volvamos al de George y Gracie, que ahora, además de sus luces intermitentes, tienen unos relojes digitales luminosos en sus trajes espaciales. Desde la perspectiva de George, él se encuentra inmóvil, mientras que Gracie, con su luz verde intermitente y su gran reloj digital, aparece en la distancia y pasa por su lado en la oscuridad del espacio vacío. George observa que el reloj de Gracie se atrasa en comparación con el suyo (con una tasa de disminución de la velocidad del reloj que depende de lo rápido que pasen el uno al lado del otro). Si fuera un poquito más astuto, percibiría también que, además del paso del tiempo en el reloj de Gracie, todo lo que se refiere a ella —el modo en que saluda al pasar, la velocidad a la que parpadea, etc.— sucede a cámara lenta. Desde la perspectiva de Gracie, se pueden hacer exactamente las mismas observaciones con respecto a George.

Aunque esto resulte aparentemente paradójico, intentemos describir con precisión un experimento que pondrá de manifiesto un absurdo lógico. La posibilidad más sencilla es organizar las cosas de tal manera que, cuando George y Gracie pasen uno al lado del otro, ambos ajusten sus relojes de forma que indiquen las 12.00. A medida que se alejan, cada uno de ellos dirá que el reloj del otro funciona con mayor lentitud que el reloj propio. Para confrontar esta disparidad directamente, George y Gracie deben reunirse y comparar el tiempo que ha transcurrido en sus relojes. Pero ¿cómo pueden hacerlo? Bueno, George tiene un propulsor que puede utilizar para, desde su punto de vista, alcanzar a Gracie. Sin embargo, si lo hace, la simetría de sus dos perspectivas, que es la causa de la aparente paradoja, se rompe, puesto que George se habrá sometido a un movimiento *acelerado*, es decir, un movimiento que ya no es independiente de cualquier fuerza. Cuando se reúnen de esta manera, habrá transcurrido menos tiempo en el reloj de George, que ahora sí puede decir que estaba en movimiento, porque ha podido notarlo. Entonces, los puntos de vista de George y Gracie no estarán ya en pie de igualdad. Al poner en marcha su propulsor, George renuncia a su derecho a afirmar que estaba inmóvil.

Si George va en pos de Gracie de este modo, la diferencia de tiempo que muestren sus relojes dependerá de su velocidad relativa y de la forma (datos de aceleración y velocidad) en que George utilice su propulsor. Como ya sabemos a estas alturas, si las velocidades utilizadas son pequeñas, la diferencia será insignificante. Pero si se trata de fracciones importantes de la velocidad de la luz, las diferencias pueden ser minutos, días, años, siglos, o aún más. Por poner un ejemplo concreto, supongamos que la velocidad relativa de George y Gracie cuando se cruzan y se alejan es el 99,5 por 100 de la velocidad de la luz. Además, digamos que George

espera tres años, según su reloj, antes de poner en marcha su propulsor para conseguir un impulso momentáneo que le pone en movimiento, para situarse a la par de Gracie, a la misma velocidad a la que estaban alejándose anteriormente, es decir, el 99,5 por 100 de la velocidad de la luz. Cuando alcanza a Gracie, habrán transcurrido seis años en su reloj ya que tardará tres años en alcanzarla. Sin embargo, las fórmulas matemáticas de la relatividad especial demuestran que habrán transcurrido sesenta años en su reloj. Esto no es un truco de prestidigitación: Gracie tendrá que hacer memoria, retrocediendo sesenta años, para recordar su primer encuentro con George en el espacio. Por otra parte, para George esto sucedió sólo seis años antes. En realidad, a George su movimiento le ha convertido en un viajero a través del tiempo, aunque en un sentido muy concreto: ha viajado al futuro de Gracie.

Poner los dos relojes juntos de nuevo para realizar una comparación directa podría parecer un mero fastidio logístico, pero éste es realmente el fondo de la cuestión. Podemos imaginar toda una variedad de trucos para evitar caer en este punto débil de la paradoja, pero en última instancia todos fallarían. Por ejemplo, en vez de volver a poner los dos relojes juntos, ¿qué pasaría si George y Gracie compararan sus relojes mediante una comunicación telefónica celular? Si esta comunicación fuera instantánea, nos encontraríamos con una contradicción lógica insoslayable: desde la perspectiva de Gracie, el reloj de George se atrasa y, por lo tanto, George debe decir que ha transcurrido una cantidad de tiempo menor; razonando desde el punto de vista de George, el reloj de Gracie se atrasa y, por lo tanto Gracie debe decir que ha transcurrido una cantidad de tiempo menor. No puede ser que ambos tengan razón, luego nos vamos a pique con nuestro experimento. La cuestión es, por supuesto, que los teléfonos celulares, como cualquier forma de comunicación, no transmiten sus señales instantáneamente. Los teléfonos celulares funcionan mediante ondas de radio, que son una forma de luz, por lo que la señal que transmiten se propaga a la velocidad de la luz. Esto significa que transcurre un cierto tiempo hasta que las señales se reciben —de hecho, una dilación en el tiempo es suficiente para hacer que cada punto de vista sea compatible con el otro.

Veamos esto, en primer lugar, desde la perspectiva de George. Supongamos que cada hora, a la hora exacta, George dice por su teléfono celular: «Son las doce en punto y todo va bien», «es la una en punto y todo va bien», y así sucesivamente. Dado que desde la perspectiva de George el reloj de Gracie se atrasa, a primera vista, él piensa que Gracie recibirá sus mensajes antes de que su reloj alcance la hora indicada. De este modo, George llega a la conclusión de que Gracie tendrá que reconocer que es su reloj el que se atrasa. Pero, entonces lo vuelve a pensar de la siguiente manera: «Puesto que Gracie se está alejando de mí, la señal que le envío por el teléfono celular debe recorrer distancias aún mayores para llegar hasta ella. Puede que este tiempo de viaje adicional compense el retraso de su reloj». El

reconocimiento por parte de George de que existen otros efectos concurrentes —el atraso del reloj de Gracie contra el tiempo de viaje de su señal— le sugiere la idea de sentarse a calcular cuantitativamente el efecto combinado resultante. El resultado que obtiene es que el efecto del tiempo del viaje *compensa con creces* el atraso del reloj de Gracie. Llega a la sorprendente conclusión de que Gracie recibirá las señales que le comunican que ha pasado una hora en el reloj de él, *después* de que la hora indicada haya pasado en el reloj de ella. De hecho, puesto que George es consciente de que Gracie tiene amplios conocimientos de física, sabe que ella tendrá en cuenta el tiempo de viaje de la señal cuando saque conclusiones sobre el reloj *de él* basándose en su comunicación a través del teléfono celular. Un poco más de cálculo muestra cuantitativamente que, incluso teniendo en cuenta el tiempo invertido en el viaje, el análisis que hace Gracie de las señales de George le llevará a la conclusión de que el reloj de éste funciona con más lentitud que el suyo.

Exactamente el mismo razonamiento es aplicable si adoptamos el punto de vista de Gracie en el caso de que ella enviara señales horarias a George: al principio, la lentitud del reloj de George, desde la perspectiva de Gracie, le llevaría a ésta a pensar que él recibirá sus mensajes horarios antes de emitir los suyos propios. Sin embargo, cuando Gracie considera las distancias cada vez mayores que su señal debe recorrer para alcanzar a George mientras éste se aleja en la oscuridad, se da cuenta de que en realidad George las recibirá *después* de haber enviado él sus propias señales. Una vez más, Gracie es consciente de que, incluso si George tiene en cuenta el tiempo que dura el viaje, él llegará a la conclusión, a partir de lo que le comunica Gracie por el teléfono celular, de que el reloj de ella se atrasa con respecto al suyo.

Siempre y cuando ni Gracie, ni George aceleren sus perspectivas estarán en un pie de igualdad exacto. Aunque resulte paradójico, de este modo ambos constatan que es perfectamente lógico el hecho de que cada uno piense que el reloj del otro se atrasa.

El efecto del movimiento en el espacio

La discusión anterior pone de manifiesto que los observadores ven que los relojes en movimiento funcionan más lentamente que los suyos propios, es decir, el tiempo se ve afectado por el movimiento. Sólo falta un paso para ver que el movimiento tiene un efecto igual de impresionante en el espacio. Volvamos al caso de Slim y Jim en la pista de carreras. Cuando el coche aún estaba en la exposición del concesionario, como ya dijimos, Slim había medido cuidadosamente la longitud de su nuevo coche

con una cinta métrica. Cuando Slim circula por la pista de carreras, Jim no puede utilizar este procedimiento para medir la longitud del coche, por lo que ha de proceder de una manera indirecta. Uno de los métodos posibles, como ya hemos indicado anteriormente, es el siguiente: Jim pone en marcha su cronómetro justo cuando el paragolpes delantero del coche llega al lugar donde él se encuentra y lo para justo cuando el paragolpes trasero pasa por delante de él. Multiplicando el tiempo transcurrido por la velocidad del coche, Jim puede determinar la longitud del mismo.

Utilizando nuestras recién descubiertas apreciaciones de las sutilezas del tiempo, constatamos que, desde su propio punto de vista, Slim está inmóvil, mientras Jim está en movimiento, por lo que Slim ve que el reloj de Jim se atrasa. En consecuencia, Slim se da cuenta de que la medición indirecta de la longitud del coche realizada por Jim dará una longitud *más corta* que la que él midió en el concesionario, ya que en el cálculo de Jim (longitud igual a velocidad multiplicada por el tiempo transcurrido) éste mide el tiempo transcurrido en un reloj que se atrasa. Si el reloj se atrasa, el tiempo transcurrido que Jim registra será menor y el resultado de su cálculo será una longitud menor.

De esta manera, Jim constata que la longitud del coche de Slim cuando está en movimiento es menor que cuando se mide estando el coche parado. Éste es un ejemplo del fenómeno general según el cual los observadores perciben que un objeto en movimiento es más corto a lo largo de la dirección de su movimiento. Por ejemplo, las ecuaciones de la relatividad especial demuestran que si un objeto se mueve a aproximadamente un 98 por 100 de la velocidad de la luz, un observador inmóvil lo verá un 80 por 100 más corto que si el objeto estuviera parado. Este fenómeno se ilustra en la Figura 2.4.[9]

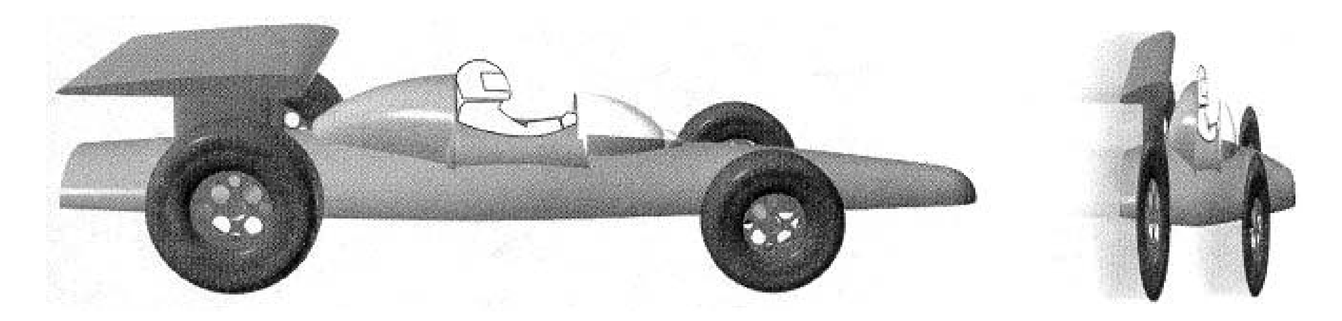


Figura 2.4 Un objeto en movimiento es acortado en la dirección de su movimiento.

El movimiento a través del espacio-tiempo

El carácter constante de la velocidad de la luz ha dado como resultado que la visión tradicional del espacio y el tiempo como estructuras rígidas y objetivas se haya sustituido por una nueva concepción en la que dependen estrechamente del movimiento relativo existente entre el observador y lo observado. Podríamos finalizar nuestra discusión aquí, después de constatar que los objetos en movimiento evolucionan a cámara lenta y se ven acortados. Sin embargo, la relatividad especial ofrece una perspectiva más profundamente unificada que engloba estos fenómenos.

Para entender este punto de vista, supongamos que tenemos un automóvil, más bien poco práctico, que alcanza rápidamente su velocidad de crucero de 160 kilómetros por hora y se mantiene a esta velocidad, ni más, ni menos, hasta que deja de funcionar y se para.

Supongamos también que, dada su creciente reputación de conductor experto, se le pide a Slim que pruebe el coche conduciendo por una pista larga, recta y ancha situada en medio de un tramo llano de un desierto. Como la distancia entre las líneas de salida y llegada es de 16 kilómetros, el coche debería cubrir esta distancia en la décima parte de una hora, es decir, en seis minutos. Jim, que también trabaja como ingeniero mecánico, inspecciona los datos registrados en varias docenas de pruebas y se alarma al comprobar que, aunque los tiempos de la mayoría de ellas fueron de 6 minutos, unas pocas de las últimas pruebas daban unos tiempos bastante más largos: 6’5, 7 e incluso 7’5 minutos. Al principio sospecha la existencia de un problema mecánico, ya que esos tiempos parecen indicar que el coche rodaba a menos de 160 kilómetros por hora en los tres últimos recorridos. Sin embargo, después de examinar detenidamente el coche, se convence de que está en perfectas condiciones. Sintiéndose incapaz de explicar esos tiempos anormalmente largos, consulta con Slim y le pregunta sobre los últimos recorridos. Slim tiene una explicación muy sencilla. Le dice a Jim que, debido a que la pista va de este a oeste, al acercarse el final del día, el sol le deslumbraba los ojos. Durante los últimos tres recorridos resultaba tan desagradable que condujo de un extremo al otro de la pista con un pequeño ángulo de desviación. Dibuja un esbozo aproximado del camino que tomó en los tres últimos recorridos, y que se ve en la Figura 2.5. La explicación de los tres tiempos más largos está ahora perfectamente clara: el camino desde la línea de salida hasta la de llegada es más largo si se circula con un ángulo de desviación y, por consiguiente, conduciendo a la misma velocidad de 160 kilómetros por hora, lleva más tiempo cubrir el recorrido. Dicho de otro modo, si se hace el trayecto con un ángulo de desviación, parte de los 160 kilómetros por hora se invierten en ir de sur a norte, dejando una parte mucho menor de esta velocidad para hacer el recorrido de este a oeste. Esto implica que se tardará un poco más en atravesar la pista.

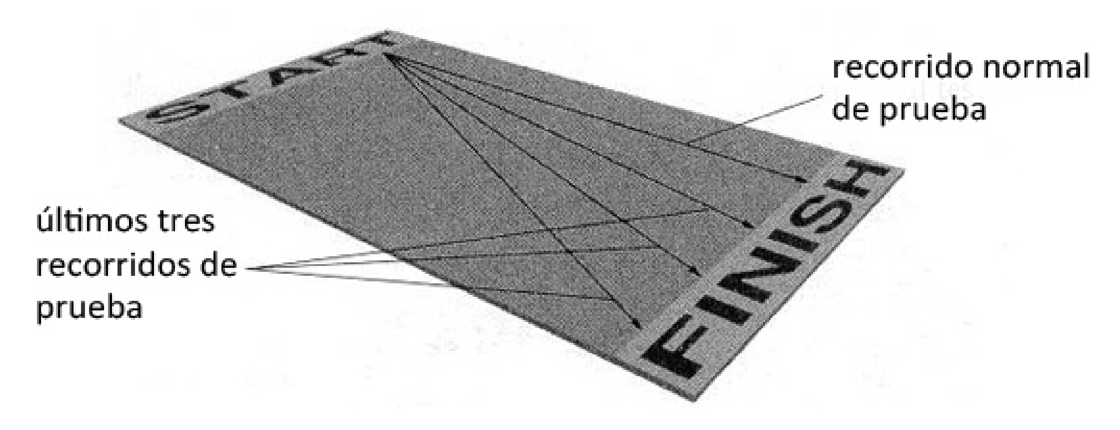


Figura 2.5 Debido al deslumbramiento producido por el sol al final de la tarde, Slim condujo con un álgulo de desviación cada vez mayor durante los tres últimos recorridos.

Vista así, la explicación de Slim es fácil de comprender: sin embargo, merece la pena retocarla ligeramente para poder dar el salto conceptual que estamos a punto de abordar. Las direcciones norte-sur y este-oeste son dos dimensiones espaciales independientes en las que un coche se puede mover. (También se puede mover verticalmente, por ejemplo, cuando sube un puerto de montaña, pero aquí no necesitamos tener en cuenta esa posibilidad). La explicación de Slim aclara que, aunque el coche circulaba a 160 kilómetros por hora en todos los recorridos de prueba, durante los últimos recorridos repartió su velocidad entre las dos dimensiones y por lo tanto parece como si hubiera conducido a una velocidad de menos de 160 kilómetros por hora en la dirección este-oeste. Durante los recorridos anteriores, la totalidad de los 160 kilómetros por hora se dedicaban sólo al movimiento en dirección este-oeste; durante los últimos tres recorridos, parte de esta velocidad se utilizó para realizar también un movimiento en dirección norte-sur.

Einstein descubrió que precisamente esta idea —el hecho de repartir el movimiento entre dimensiones diferentes— estaba detrás de todos los notables hallazgos de la física en lo referente a la relatividad especial, cuando nos damos cuenta de que el movimiento de un objeto no sólo puede ser compartido por varias dimensiones espaciales, sino que también la dimensión *tiempo* puede compartir este movimiento. De hecho, en la mayoría de los casos, *la mayor parte* del movimiento de un objeto se realiza a través del tiempo, no del espacio. Veamos qué significa esto.

El movimiento a través del espacio es un concepto que aprendemos ya en los primeros tiempos de nuestra vida. Aunque a menudo no pensamos sobre las cosas en estos términos, también sabemos que nosotros, nuestros amigos, nuestras pertenencias, etc., asimismo todo *se mueve a través del tiempo*. Cuando miramos un reloj de pared o de pulsera, incluso cuando estamos sentados ociosamente viendo la televisión, la lectura del reloj cambia continuamente, «moviéndose hacia delante en el tiempo» constantemente. Nosotros, y todo lo que nos rodea, estamos envejeciendo, pasando inevitablemente de un momento a otro en el tiempo. En efecto, el matemático Hermann Minkowski, y finalmente Einstein también, abogaban por que

se considerara el tiempo como una dimensión más del universo —la cuarta dimensión— muy similar en cierto modo a las tres dimensiones espaciales en las que nos encontramos inmersos. Aunque suene abstracto, el concepto del tiempo como una dimensión es realmente concreto. Cuando queremos citarnos con alguien, le decimos dónde esperamos verle «en el espacio», por ejemplo, en el piso 9° del edificio situado en la esquina de la Calle 53 y la 7ª Avenida. Aquí tenemos tres informaciones (piso 9º, Calle 53 y 7ª Avenida) que reflejan una posición concreta en las tres dimensiones espaciales del universo. Sin embargo, es igualmente importante que especifiquemos *cuándo* esperamos encontramos con esa o esas personas —por ejemplo, a las 15.00—. Este dato nos indica en qué lugar «del tiempo» se producirá nuestro encuentro. Por lo tanto, los sucesos se especifican dando la información mediante *cuatro* datos: tres relativos al espacio y uno sobre el tiempo. Se dice que tales datos especifican la ubicación del suceso en el espacio y en el tiempo, o abreviadamente en el *espacio-tiempo*. En este sentido, el tiempo es otra dimensión.

Dado que desde este punto de vista se afirma que el espacio y el tiempo son sencillamente distintos ejemplos de dimensiones, ¿podemos hablar de la velocidad de un objeto a través del tiempo de un modo similar al concepto de su velocidad a través del espacio? Sí, podemos.

Una pista importante para conseguirlo procede de una información capital que ya hemos descubierto. Cuando un objeto se mueve a través del espacio en un movimiento relativo a nosotros, su reloj se atrasa si lo comparamos con el nuestro. Es decir, *la velocidad de su movimiento a través del tiempo se vuelve más lenta*. Aquí está el obstáculo: Einstein afirmó que cualquier objeto del universo está *siempre* viajando a través del espacio-tiempo a una velocidad fija —la de la luz—. Esta idea resulta extraña; estamos acostumbrados a pensar que los objetos viajan a velocidades considerablemente menores que la de la luz. Hemos puesto el énfasis repetidas veces en esto, considerándolo como la razón por la cual los efectos de la relatividad son tan desconocidos en la vida cotidiana. Todo esto es verdad. En este momento estamos hablando de la velocidad combinada de un objeto a través del *conjunto de las cuatro* dimensiones —tres dimensiones espaciales y una temporal— y precisamente en este sentido de generalización es donde la velocidad del objeto es igual a la velocidad de la luz. Para una comprensión más amplia de todo esto y para poner de manifiesto su importancia, observamos que, como en el caso, discutido anteriormente, del poco práctico automóvil que tenía una velocidad, esta única velocidad fija puede repartirse entre las diferentes dimensiones, es decir, las del espacio y el tiempo. Si un objeto está inmóvil (con relación a nosotros) y en consecuencia no se mueve en absoluto a través del espacio, entonces, igual que sucedía en los primeros recorridos del coche, todo el movimiento del objeto se utiliza para viajar a través de una sola dimensión —en este caso, la dimensión del tiempo—. Además, todos los objetos que están

inmóviles en relación con nosotros, y también entre ellos mismos, se mueven a través del tiempo —envejecen— a exactamente la misma velocidad o con la misma rapidez. Sin embargo, si un objeto se mueve a través del espacio, esto significa que una parte del movimiento previo a través del tiempo ha de desviarse: al igual que el coche que circulaba con un cierto ángulo de desviación, este reparto del movimiento implica que el objeto viajará a través del tiempo más lentamente que los otros objetos que están inmóviles, ya que ahora utiliza parte de su movimiento para moverse a través del espacio. Es decir, su reloj funcionará más lentamente si se mueve a través del espacio. Esto es exactamente lo que habíamos observado antes. Ahora vemos que el tiempo transcurre más despacio cuando un objeto se mueve con respecto a nosotros porque desvía parte de su movimiento a través del tiempo para convertirlo en un movimiento a través del espacio. La velocidad de un objeto a través del espacio es, por lo tanto, meramente un reflejo de la cantidad que se desvía de su movimiento a través del tiempo.[10]

También vemos que en este marco está implícito el hecho de que existe un límite para la velocidad espacial de un objeto: la velocidad máxima a través del espacio se produce si *todo* el movimiento de un objeto a través del tiempo se desvía para convertirlo en movimiento a través del espacio. Esto sucede cuando todo su movimiento previo a la velocidad de la luz a través del tiempo se desvía para convertirse en movimiento a la velocidad de la luz a través del espacio. Pero, una vez que se ha agotado todo su movimiento a través del tiempo, ésta es la velocidad *más rápida* a través del espacio que el objeto —cualquier objeto— puede posiblemente alcanzar. Es un caso análogo al de nuestro coche si las pruebas lo condujeran directamente en dirección norte-sur. Del mismo modo que al coche no le quedaría nada de velocidad para realizar un movimiento en la dirección este-oeste, a algo que se desplazara a la velocidad de la luz a través del espacio no le quedaría velocidad para moverse a través del tiempo. Por lo tanto, la luz no envejece; un fotón que emergió del *big bang* tiene actualmente la misma edad que tenía entonces. A la velocidad de la luz no existe el paso del tiempo.

¿Qué sucede con $E = mc^2$?

Aunque Einstein no propuso que su teoría se llamara teoría de la «relatividad» (en vez de esto, sugirió el nombre de teoría de la «invariabilidad» para reflejar el carácter invariable de la velocidad de la luz, entre otras cosas), el significado de la expresión está claro ahora. La obra de Einstein demostró que conceptos tales como espacio y

tiempo, que anteriormente parecían estar separados y ser absolutos, en realidad están entrelazados y son relativos. Einstein demostró además que otras propiedades físicas del universo, sorprendentemente, también están interrelacionadas. La más famosa de sus fórmulas constituye uno de los ejemplos más importantes. En ella Einstein afirmaba que la energía (E) de un objeto y su masa (m) no son conceptos independientes; podemos determinar la energía a partir de la masa del objeto multiplicando ésta dos veces por la velocidad de la luz, o sea por c^2 o podemos determinar la masa conociendo su energía (dividiendo esta última dos veces por la velocidad de la luz). En otras palabras, la energía y la masa —como los dólares y los euros— son divisas convertibles. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con el dinero, el tipo de cambio dado por los dos factores de la velocidad de la luz es siempre fijo. Dado que este tipo de cambio es tan grande (c^2 es una cantidad considerable), una masa pequeña llega a producir una cantidad enormemente grande de energía. En Hiroshima se utilizó como arma el devastador poder destructivo obtenido de la conversión en energía de menos del 1 por ciento de 900 gramos de uranio; algún día, en centrales energéticas de fusión nuclear podremos utilizar productivamente la fórmula de Einstein para satisfacer la energía de todo el mundo con nuestra inagotable provisión de agua de mar.

Teniendo en cuenta los conceptos que hemos puesto de relieve en este capítulo, la fórmula de Einstein nos da la explicación más concreta del hecho fundamental de que nada puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Quizá se pregunte el lector por qué no podemos tomar algún objeto, por ejemplo un muon, que un acelerador de partículas haya impulsado hasta conseguir que se mueva a 298.168 kilómetros por segundo —el 99,5 por 100 de la velocidad de la luz— y «empujarlo un poco más», consiguiendo que vaya al 99,9 por 100 de la velocidad de la luz, y entonces «empujarlo *realmente* un poco más» para hacer que cruce la barrera de la velocidad de la luz. La fórmula de Einstein explica por qué esos esfuerzos nunca tendrán éxito. Cuanto más rápido se mueve un objeto, más energía tiene y, a partir de la fórmula de Einstein, vemos que cuanta más energía tiene un objeto, más masa posee. Por ejemplo, los muones que se desplacen al 99,9 por 100 de la velocidad de la luz pesan mucho más que los muones inmóviles. De hecho, la verdad es que se vuelven 22 veces más pesados. (Las masas que se indican en la Tabla 1.1 se refieren a partículas inmóviles). Pero, cuanta más masa tiene un objeto, más difícil es incrementar su velocidad. Una cosa es empujar a un niño que va en una bicicleta, pero empujar un camión Mack es algo muy diferente. Así, a medida que un muon se mueve más rápido, se hace cada vez más difícil aumentar aún más su velocidad. Cuando se desplaza a un 99,999 por 100 de la velocidad de la luz, la masa de un muon se multiplica por 224; a un 99,99999999 por 100 de la velocidad de la luz se multiplica por un factor que es más de 70.000. Como la masa del muon aumenta sin límite a

medida que su velocidad se aproxima a la de la luz, sería necesario un impulso dado con una cantidad *infinita* de energía para alcanzar o superar la barrera de la velocidad de la luz. Por supuesto, esto es imposible y, en consecuencia, ningún objeto puede moverse más rápido que la luz.

Como veremos en el próximo capítulo, esta conclusión prepara el terreno para el segundo conflicto importante al que se ha enfrentado la física durante el pasado siglo y finalmente socava los cimientos de otra teoría venerable y querida: la teoría universal de la gravedad de Newton.

Capítulo 3

Sobre alabeos y ondulaciones

Mediante la relatividad especial Einstein resolvió el conflicto planteado entre el «viejo conocimiento intuitivo» del movimiento y el valor constante de la velocidad de la luz. En pocas palabras, la solución es que nuestra intuición se equivoca: su información se limita a movimientos que habitualmente son extremadamente lentos en comparación con la velocidad de la luz, y estas velocidades tan pequeñas oscurecen el verdadero carácter del espacio y el tiempo. La relatividad especial revela la auténtica naturaleza del espacio y el tiempo y demuestra que difieren radicalmente de cualquier concepción previa. Sin embargo, reparar las deficiencias de nuestra comprensión del espacio y el tiempo no era una empresa fácil. Einstein pronto se dio cuenta de que entre las numerosas repercusiones derivadas de la revelación de la relatividad especial, una era especialmente profunda: la afirmación de que nada podía sobrepasar la velocidad de la luz resulta ser incompatible con la tan reverenciada teoría de la gravitación universal de Newton, propuesta en la segunda mitad del siglo diecisiete. Así, la relatividad especial, mientras resolvía un conflicto, hacía surgir otro. Después de una década de intenso y, a veces, penoso estudio, Einstein resolvió este dilema mediante la teoría de la relatividad general. En esta teoría, Einstein, una vez más, revolucionaba nuestro modo de comprender el espacio y el tiempo demostrando que éstos se alabean y deforman para transmitir la fuerza de la gravedad.

La forma en que Newton veía la gravedad

Isaac Newton, nacido en 1642 en Lincolnshire, Inglaterra, cambió el carácter de la investigación científica poniendo toda la fuerza de las matemáticas al servicio de la investigación en física. Newton tenía un intelecto tan monumental que, por ejemplo, cuando descubrió que las matemáticas que necesitaba para algunas de sus

investigaciones no existían, las inventó. Pasarían casi tres siglos antes de que el mundo volviera a albergar a un genio de la ciencia comparable con Newton. De entre sus numerosas y profundas ideas sobre el funcionamiento del universo, la que nos interesa aquí fundamentalmente es su teoría de la gravitación universal.

La fuerza de la gravedad está por todas partes en la vida cotidiana. Nos mantiene a nosotros y a todos los objetos que nos rodean sujetos a la superficie de la Tierra; impide que el aire que respiramos se escape al espacio exterior; hace que la Luna se mantenga en órbita alrededor de la Tierra, y mantiene a la Tierra en su órbita alrededor del Sol. La gravedad dicta el ritmo de la danza cósmica que ejecutan incansable y meticulosamente los miles y miles de millones de habitantes del cosmos, desde los asteroides hasta los planetas, las estrellas y las galaxias. Más de tres siglos de influencia de la teoría de Newton hacen que consideremos evidente que una única fuerza —la gravedad— es responsable de toda esta riqueza de sucesos terrestres y extraterrestres. Sin embargo, antes de Newton no se comprendía que la manzana que cae de un árbol al suelo da testimonio del mismo principio físico que hace que los planetas se mantengan dando vueltas alrededor del Sol. Dando un paso audaz al servicio de la hegemonía científica, Newton unió los principios físicos que rigen el cielo y la tierra, afirmando que la fuerza de la gravedad es la mano invisible que funciona en todos los ámbitos.

El concepto que Newton tenía de la gravedad se podría denominar el gran ecualizador. Afirmó que absolutamente todo ejerce una fuerza de atracción gravitatoria sobre absolutamente todas las demás cosas. Independientemente de su estructura física, *cualquier cosa* ejerce y siente la fuerza de la gravedad. Basándose en un detallado estudio del análisis del movimiento planetario que realizó Johannes Kepler, Newton dedujo que la fuerza de atracción entre dos cuerpos depende *precisamente* de dos cosas: la cantidad de materia que compone cada uno de los cuerpos y la distancia que los separa. La materia comprende el número total de protones, neutrones y electrones, lo cual a su vez determina la *masa* del objeto. La teoría de la gravitación universal de Newton afirma que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es grande para cuerpos de gran masa y es menor entre los cuerpos de menor masa; también afirma que la fuerza de atracción es mayor cuanto menor sea la distancia que separa los cuerpos y es menor cuando la separación es mayor.

Newton fue mucho más allá de esta descripción cualitativa y escribió unas fórmulas que determinan cuantitativamente la intensidad de la fuerza de gravedad existente entre dos cuerpos. Dicho con palabras, esas fórmulas afirman que la fuerza de la gravedad que se ejerce entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre ellos. Esta «ley de la gravedad» se puede utilizar para predecir el movimiento de los planetas y los cometas alrededor del Sol, el de la Luna alrededor de la Tierra, y el de

los cohetes que se envían al espacio para realizar exploraciones planetarias. También tiene aplicaciones más corrientes como el movimiento de las pelotas de béisbol que van por el aire y los distintos recorridos en espiral desde el trampolín a la piscina. La concordancia entre las predicciones y el movimiento real observado en tales objetos es espectacular. Este éxito produjo un apoyo incondicional a la teoría de Newton hasta principios del siglo XX. Sin embargo, el descubrimiento de la relatividad especial por parte de Einstein generó lo que resultó ser un obstáculo insalvable para la teoría de Newton.

La incompatibilidad entre la teoría newtoniana de la gravedad y la relatividad especial

Una cuestión fundamental dentro de la relatividad especial es la barrera absoluta a la velocidad que la luz impone. Es importante constatar que este límite no sólo es aplicable a los objetos materiales, sino también a las señales e influencias de todo tipo. Lo que sucede es sencillamente que no hay manera de transmitir una información o una perturbación de un lugar a otro con una velocidad mayor que la de la luz. Por supuesto, el mundo está lleno de modos de transmitir perturbaciones a *velocidades menores* que la de la luz. Por ejemplo, lo que usted dice o cualquier otro sonido se transmite mediante vibraciones que viajan a unos 331 metros por segundo, que es una velocidad muy pequeña en comparación con los 300.000 kilómetros por segundo de la velocidad de la luz. Esta diferencia de velocidades se hace evidente cuando vemos un partido de béisbol desde unos asientos situados lejos de la base del bateador. Cuando un bateador golpea la pelota, el sonido nos llega un momento *después* de ver cómo esa pelota recibe el golpe. Algo similar sucede durante una tormenta. Aunque el rayo y el trueno se producen simultáneamente, vemos el rayo antes de oír el trueno. De nuevo, esto refleja la diferencia sustancial que existe entre la velocidad de la luz y la del sonido. El triunfo de la relatividad especial nos informa de que la situación inversa, en la que algún tipo de señal nos llegaría *antes* que la luz emitida, no es posible. No hay nada que adelante a los fotones.

Aquí está el quid del asunto. En la teoría de la gravedad de Newton, un cuerpo ejerce una atracción gravitatoria sobre otro con una fuerza determinada exclusivamente por la masa de los objetos que intervienen y la magnitud de su distancia de separación. Esta fuerza no tiene nada que ver con el tiempo que los objetos han permanecido el uno en presencia del otro. Esto significa que si sus masas o su distancia de separación cambiasen, según Newton los objetos experimentarían

inmediatamente un cambio en su atracción gravitatoria mutua. Por ejemplo, la teoría de la gravedad de Newton afirma que, si el Sol explotara súbitamente, la Tierra —situada a una distancia de unos 150 millones de kilómetros— sufriría al momento la salida de su órbita elíptica habitual. A pesar de que la luz generada por la explosión tardaría 8 minutos en llegar desde el Sol a la Tierra, según la teoría de Newton la información de que el Sol había explotado se transmitiría de forma instantánea a la Tierra través del cambio brusco que se produciría en la fuerza gravitatoria que gobierna su movimiento.

Esta conclusión entra en contradicción directa con la relatividad especial, ya que esta teoría garantiza que ninguna información se puede transmitir a una velocidad mayor que la de la luz: la transmisión instantánea viola este precepto contradiciéndolo radicalmente.

En consecuencia, a principios del siglo XX Einstein constató que la teoría de la gravedad de Newton, aunque siempre había tenido un enorme éxito, se contradecía con su teoría de la relatividad especial. Lleno de confianza en la veracidad de la relatividad especial y a pesar de la cantidad de experimentos que apoyaban la teoría de Newton, Einstein buscó una nueva teoría de la gravedad que fuera compatible con la relatividad especial. Esto finalmente le llevó al descubrimiento de la relatividad general, en la que el carácter del espacio y del tiempo sufrió de nuevo una notable transformación.

La idea más feliz de Einstein

Incluso antes del descubrimiento de la relatividad especial la teoría de la gravedad de Newton presentaba deficiencias en un aspecto importante. Aunque se podía utilizar para hacer predicciones con una gran exactitud sobre cómo se moverían los objetos bajo la influencia de la gravedad, esta teoría no proporciona ninguna idea sobre lo que es la gravedad. Es decir, ¿cómo puede ser que dos cuerpos físicamente separados el uno del otro, posiblemente situados a cientos de millones de kilómetros de distancia, o más, sin embargo influyan el uno en el movimiento del otro? ¿De qué medios se vale la gravedad para llevar a cabo su misión? Este es un problema del que el propio Newton era muy consciente. Según sus propias palabras:

> Es inconcebible que una materia bruta inanimada, sin la mediación de algo más, que no es material, afecte a otra materia y actúe sobre ella sin que exista contacto mutuo. Que la gravedad sea innata, inherente y esencial

> para la materia, de tal modo que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia a través del vacío sin la mediación de ninguna otra cosa por la cual y a través de la cual se pueda transmitir la acción y la fuerza de estos cuerpos, del uno al otro, es para mí algo tan absurdo que creo que no puede acostumbrarse a ello ningún ser humano, aunque tenga una facultad competente para pensar en cuestiones filosóficas. Debe existir un agente que cause la gravedad actuando constantemente de acuerdo con ciertas leyes; pero dejo a la consideración de mis lectores el hecho de si este agente ha de ser material o inmaterial.[11]

Es decir, Newton aceptó la existencia de la gravedad y a continuación desarrolló fórmulas que describen con precisión sus efectos, pero nunca ofreció una explicación sobre cómo funciona realmente. Lo que dio al mundo fue un «manual del usuario» para la gravedad en el que explicaba cómo «utilizarla», unas instrucciones que los físicos, los astrónomos y los ingenieros han aprovechado con éxito para trazar la trayectoria de las naves espaciales que van a la Luna, a Marte y a otros planetas del sistema solar; también para predecir los eclipses solares y lunares, el movimiento de los cometas, etc. Pero dejó que el funcionamiento interno —el contenido de la «caja negra» de la gravedad— siguiera siendo un misterio total. Cuando utilizamos el reproductor de discos compactos o nuestro ordenador personal, podemos encontrarnos en un estado de ignorancia similar por lo que respecta a cómo funcionan internamente. Mientras se sepa cómo manejar estos instrumentos, nadie necesita saber de qué modo realizan las tareas que les encomendamos. Sin embargo, si el reproductor de discos compactos o el ordenador sufren una avería, su reparación se basa fundamentalmente en el conocimiento de su funcionamiento interno. De un modo similar, Einstein constató que, a pesar de la confirmación experimental llevada a cabo durante cientos de años, la relatividad especial implicaba que, de algún modo sutil, la teoría de Newton estaba «averiada» y que su reparación requería enfrentarse a la cuestión de la auténtica naturaleza de la gravedad y examinarla a fondo.

En 1907, mientras reflexionaba sobre estas cuestiones en su mesa de la oficina de patentes de Berna, Suiza, Einstein tuvo la idea crucial que, a trancas y a barrancas, le llevaría finalmente a una teoría de la gravedad radicalmente nueva: un planteamiento que no se limitaría a llenar la laguna existente en la teoría de Newton, sino que reformularía completamente el modo de pensar sobre la gravedad y, lo que es más importante, lo haría de una manera totalmente coherente con la relatividad especial.

El planteamiento que ideó Einstein es relevante para aclarar una cuestión que ha podido dejar preocupado al lector en el capítulo 2. En dicho capítulo insistíamos en que estábamos interesados por comprender cómo verían el mundo unos individuos que se desplazaran con un movimiento relativo a velocidad constante. Comparando

detenidamente las observaciones de estos individuos, vimos aspectos que incidían seriamente en la naturaleza del espacio y el tiempo. Pero ¿qué sucede con los individuos que experimenten un movimiento *acelerado*? Las observaciones de estos individuos serán más complicadas de analizar que las de los observadores que se mueven a velocidad constante, cuyo movimiento es más sereno, aunque, sin embargo, podríamos preguntamos si hay algún modo de controlar esta complejidad y encajar el movimiento acelerado en nuestro recién descubierto modo de comprender el espacio y el tiempo.

La «idea más feliz» de Einstein mostraba cómo hacer esto. Para comprender su punto de vista, supongamos que estamos en el año 2050, que usted es el mayor experto en explosivos dentro del FBI, y que ha recibido una llamada desesperada en la que se le pide que investigue lo que parece ser una sofisticada bomba colocada en el centro de Washington D.C. Tras apersonarse apresuradamente en el lugar de los hechos y examinar el artefacto, se confirma su peor pesadilla: se trata de una bomba atómica y es tan potente que, incluso si se la enterrara profundamente en la corteza terrestre o fuera sumergida en las profundidades oceánicas, el daño producido por su explosión sería devastador. Después de estudiar cautelosamente el mecanismo de detonación, usted constata que no hay ninguna esperanza de poder desactivarlo y, además, ve que posee un ingenioso mecanismo trampa. La bomba está montada sobre una balanza. Si la lectura de lo que marca la balanza se desviara de su valor actual más del 50 por 100, la bomba estallaría. Según el temporizador, usted ve que no tiene más que una semana y empieza la cuenta atrás. El destino de millones de personas depende de usted. ¿Qué hará?

Bueno, pues teniendo en cuenta que no existe un lugar seguro ni sobre la Tierra ni dentro de ella, parece que tiene usted una sola opción: ha de enviar el artefacto a las profundidades del espacio exterior, donde su explosión no producirá daños. Presenta esta idea en una reunión de su equipo del FBI y, casi inmediatamente, un joven ayudante echa por tierra este plan. «Hay un serio problema en su plan», empieza a decir su ayudante Isaac, «a medida que el artefacto se va alejando de la Tierra, su peso disminuirá, ya que la atracción gravitatoria de la Tierra se reduce con la distancia. Eso significa que la lectura que nos da la balanza situada en el interior nos dará valores cada vez menores, haciendo que la detonación se produzca mucho antes de alcanzar la seguridad del espacio profundo». Antes de que usted tenga tiempo para reflexionar plenamente sobre esta objeción, otro joven ayudante apunta: «En efecto, si nos ponemos a pensar en ello, existe aún otro problema», dice su ayudante Albert, «este problema es tan importante como la objeción de Isaac, pero algo más sutil, así que tengan paciencia mientras lo explico». Como usted quiere disponer de un momento para pensar sobre la objeción de Isaac, intenta hacer que Albert se calle, pero, como suele suceder habitualmente, una vez que empieza no hay quien lo

detenga.

«Para enviar el artefacto al espacio exterior, tendremos que montarlo sobre un cohete. Cuando el cohete *se acelere* hacia arriba con el fin de entrar en el espacio exterior, la lectura de lo que marca la balanza *aumentará*, haciendo también en este caso que el artefacto explote prematuramente. Como ve, la base de la bomba —que se apoya sobre la balanza— empujará la balanza con más fuerza que cuando el artefacto está inmóvil, del mismo modo que nuestro cuerpo ejerce presión contra el asiento de un coche que está acelerando. La bomba hará presión sobre la balanza de la misma manera que nuestra espalda hace presión sobre la tapicería del asiento. Cuando se oprime una balanza, por supuesto su lectura aumenta, y esto hará que la bomba explote si el aumento resultante es más del 50 por 100».

Ahora, usted da las gracias a Albert por este comentario, pero, como se ha desconectado de su explicación para confirmar mentalmente la observación de Isaac, usted afirmará descorazonado que un solo golpe fatal es suficiente para matar una idea. Como la observación de Isaac es obviamente correcta, la idea de Albert ya está aniquilada. Sintiéndose algo desesperanzado, usted pide nuevas sugerencias. En ese momento, a Albert se le ocurre una idea asombrosa: «Por otra parte, pensándolo bien», prosigue, «no creo que su idea esté en absoluto fuera de lugar. La observación de Isaac en el sentido de que la gravedad disminuye a medida que el artefacto asciende en el espacio significa que la lectura que nos da la balanza *bajará*. Mi afirmación de que la aceleración del cohete hacia arriba será la causa de que el artefacto empuje con mayor fuerza contra la balanza significa que la lectura de lo que marca la misma *aumentará*. Tomando ambas afirmaciones a la vez, resulta que, si ajustamos cuidadosamente la aceleración exacta que se produce de un momento a otro cuando el cohete asciende, estos dos efectos pueden *¡contrarrestarse mutuamente!* En concreto, en las primeras fases del inicio del ascenso, cuando sobre el cohete actúa aún toda la fuerza de la gravedad terrestre, éste puede acelerarse, pero no demasiado intensamente, por lo que estaríamos dentro del intervalo del 50 por 100. A medida que el cohete se vaya alejando cada vez más de la Tierra —y, por consiguiente, la fuerza de la gravedad terrestre actúe sobre él cada vez con menos intensidad— necesitaremos, como compensación, aumentar su aceleración hacia arriba. El aumento que se produzca en la lectura de lo que marca la balanza debido a la aceleración hacia arriba puede ser exactamente igual a la disminución producida por la reducción de la atracción gravitatoria, con lo que, de hecho, ¡podemos evitar que la lectura que tenemos ahora en la balanza cambie lo más *mínimo*!».

Parece que la sugerencia de Albert comienza a resultarnos lógica. «En otras palabras», le responde usted, «una aceleración hacia arriba puede sustituir a la gravedad. Podemos imitar el efecto de la gravedad mediante un movimiento acelerado adecuado».

«Exactamente», responde Albert.

«Entonces», sigue diciendo usted, «*podemos* enviar la bomba al espacio y, ajustando razonablemente la aceleración del cohete, podemos garantizar que la lectura de lo que marca la balanza no cambia, evitando así que se produzca la explosión antes de que el artefacto esté a una distancia de seguridad con respecto a la Tierra». Y de esta manera, regulando el movimiento acelerado según la gravedad —utilizando la precisión de la ingeniería espacial del siglo XXI— usted podría evitar el desastre.

El reconocimiento de que la gravedad y el movimiento acelerado están profundamente interrelacionados es la idea clave que se le ocurrió a Einstein un feliz día en la oficina de patentes de Berna. Aunque el experimento de la bomba pone de manifiesto la esencia de su idea, vale la pena formularla de nuevo dentro de un marco más cercano a lo tratado en el capítulo 2. Para ello, recordemos que si nos colocan en un compartimento sellado y sin ventanas que *no* está sometido a ninguna aceleración, no disponemos de ningún modo de determinar la velocidad a la que circulamos. El compartimento tiene el mismo aspecto y todos los experimentos que se hagan dan idénticos resultados, independientemente de la velocidad a la que nos estemos moviendo. Y, lo que es aún más importante, sin puntos de referencia externos para establecer comparaciones, ni siquiera hay modo alguno de asignar una velocidad a nuestro estado de movimiento. Por otra parte, si estuviéramos acelerando, aunque nuestras percepciones sigan limitadas por los confines del compartimento sellado, sentiríamos una fuerza sobre nuestro cuerpo. Por ejemplo, si usted está sentado en un asiento atornillado al suelo y mirando hacia delante, y el compartimento se acelera en la misma dirección, usted *sentirá* la fuerza que ejerce el asiento en su espalda, exactamente igual que en el cohete que describía Albert. De un modo similar, si el compartimento se acelera hacia arriba, usted sentirá la fuerza del suelo contra sus pies. Lo que Einstein constató es que, dentro de los confines del pequeño compartimento, usted no podrá distinguir entre estas situaciones con aceleración y otras *sin aceleración* pero *con gravedad*: cuando sus magnitudes se ajustan adecuadamente, la fuerza que usted siente proveniente del campo gravitatorio o la que proviene del movimiento acelerado son imposibles de distinguir. Si el compartimento está colocado hacia arriba sobre la superficie terrestre, usted sentirá la fuerza habitual del suelo contra sus pies, exactamente igual que en el caso de una aceleración hacia arriba; se trata justamente de la misma equivalencia que Albert utilizó en la solución que planteaba para el lanzamiento de la bomba terrorista al espacio. Si el compartimento en que se encuentra usted estuviera colocado sobre su parte posterior, usted sentiría la fuerza de su asiento sobre su espalda (impidiéndole caer), igual que cuando estaba usted sometido a una aceleración horizontal. A esta imposibilidad de distinguir entre movimiento acelerado y gravedad Einstein le dio el

nombre de *principio de equivalencia*. Este principio desempeña un papel protagonista en la relatividad general.[12]

Esta explicación muestra que lo que hace la relatividad general es terminar un trabajo que inició la relatividad especial. A través de su principio de relatividad, la teoría de la relatividad especial establece una democracia en las posiciones de los observadores: las leyes de la física resultan idénticas para todos los observadores que se encuentren en movimiento a velocidad constante. Sin embargo, se trata de una democracia limitada, ya que excluye una cantidad enorme de otros puntos de vista —los de los individuos que están sometidos a una aceleración—. Pero la teoría de Einstein de 1907 nos muestra cómo abarcar *todos* los puntos de vista —la velocidad constante y la aceleración— dentro de un marco igualitario. Dado que no existe diferencia alguna entre un puesto de observación acelerado *sin* un campo gravitatorio y un puesto de observación no acelerado *con* un campo gravitatorio, podemos asumir este último punto de vista y afirmar que *todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento, pueden proclamar que se encuentran inmóviles y que «es el resto del mundo el que se mueve junto a ellos», siempre y cuando incluyan un campo gravitatorio adecuado en la configuración de su propio entorno*. En este sentido, mediante la inclusión de la gravedad, la relatividad general garantiza que todos los puntos de observación posibles se encuentran en pie de igualdad. (Como veremos más adelante, esto significa que las distinciones entre los observadores del capítulo 2, que se basaban en el movimiento acelerado, —como cuando George iba a alcanzar a Gracie poniendo en marcha su propulsor y envejecía menos que ella— admiten una descripción equivalente sin aceleración, pero con gravedad).

Esta profunda conexión entre la gravedad y el movimiento acelerado es ciertamente un logro notable, pero ¿por qué hizo tan feliz a Einstein? La razón es, sencillamente, que la gravedad constituye un misterio. Se trata de una fuerza importante que impregna toda la vida del cosmos, pero es escurridiza y etérea. Por otra parte, el movimiento acelerado, aunque sea algo más complicado que el movimiento a velocidad constante, es concreto y tangible. Al hallar un vínculo fundamental entre ambas cosas, Einstein constató que podía utilizar su modo de comprender el movimiento como un instrumento poderoso para lograr una comprensión similar de la gravedad. Poner en práctica esta estrategia no era una tarea fácil, ni siquiera para el genio de Einstein, pero finalmente el planteamiento dio como fruto la relatividad general. Para lograr este objetivo fue necesario que Einstein estableciera un segundo vínculo en la cadena que unía la gravedad y el movimiento acelerado: la curvatura del espacio y el tiempo, que es la cuestión que abordaremos a continuación.

La aceleración y el alabeo del espacio y el tiempo

Einstein trabajó sobre el problema de comprender la naturaleza de la gravedad, dedicándose a ello con una intensidad extrema, casi obsesiva. Unos cinco años después del feliz descubrimiento realizado en la oficina de patentes de Berna, escribió al físico Arnold Sommerfeld: «Ahora estoy trabajando exclusivamente en el problema de la gravedad… Una cosa es cierta: que jamás en mi vida ha habido algo que me haya atormentado tanto como esto… Comparado con este problema, la teoría de la relatividad original (es decir, especial) es un juego de niños».[13]

Según parece, el siguiente descubrimiento clave lo hizo en 1912: una sencilla, pero sutil, consecuencia de aplicar la relatividad especial al vínculo establecido entre la gravedad y el movimiento acelerado. Para comprender este paso del razonamiento de Einstein lo más fácil es centrarse, como parece ser que hizo el propio Einstein, en un ejemplo concreto de movimiento acelerado.[14] Recordemos que un objeto sufre una aceleración si cambia la velocidad o la dirección de su movimiento. Con el fin de hacerlo más sencillo, nos centraremos en el tipo de movimiento acelerado en el que sólo cambia la dirección del movimiento del objeto, mientras su velocidad permanece fija. Concretamente, pensemos en un movimiento en círculo como el que se realiza en el Tornado de un parque de diversiones. Por si acaso el lector no ha comprobado nunca la estabilidad de su cuerpo en este tipo de atracción, diremos que se está en pie con la espalda apoyada contra el interior de una estructura circular de plexiglás que gira sobre sí misma a gran velocidad. Como todo movimiento acelerado, es un movimiento que podemos percibir —se siente que algo tira del cuerpo radialmente alejándolo del centro de la estructura y se siente cómo la pared circular de plexiglás presiona sobre la espalda, con lo que nos movemos siempre en círculo—. (De hecho, aunque no es importante en esta discusión, el movimiento de giro de la estructura hace que el cuerpo se «clave» con tal fuerza al plexiglás, que, cuando la repisa sobre la que estamos en pie cae, nuestro cuerpo no se desliza hacia abajo). Si el movimiento de la estructura es extremadamente uniforme y cerramos los ojos, la presión sobre nuestra espalda —como el apoyo de una cama— casi puede hacemos sentir que estamos acostados. Este «casi» procede del hecho de que seguimos sintiendo la gravedad «vertical» ordinaria, por lo que nuestro cerebro no se engaña del todo. Sin embargo, si nos montáramos en un Tornado situado en el espacio exterior y giráramos justo a la velocidad adecuada, nuestro cerebro sí que sentiría exactamente igual que si estuviéramos acostados en una cama inmóvil sobre la superficie terrestre. Además, si nos «levantáramos» y nos pusiéramos a caminar por el interior de la estructura circular de plexiglás que está girando, nuestros pies presionarían contra ella igual que lo hacen contra un suelo sobre la superficie terrestre. De hecho, las estaciones espaciales están diseñadas para girar de esta manera con el fin de crear una sensación

artificial de gravedad en el espacio exterior.

Después de haber imitado la gravedad utilizando el movimiento acelerado del Tornado que giraba, podemos ahora seguir los razonamientos de Einstein y ponernos en marcha para ver cómo percibe el espacio y el tiempo alguien que está montado en ese aparato. El razonamiento de Einstein, adaptado a esta situación, sería como vamos a ver a continuación. Nosotros, los observadores inmóviles, podemos medir fácilmente la circunferencia y el radio del aparato que gira. Por ejemplo, para medir la circunferencia podemos colocar una regla —poniendo cada vez un extremo de ella en el punto al que habíamos llegado antes— a lo largo del contorno del aparato; para hallar su radio podemos utilizar el mismo método de la regla, desplazándonos desde el eje central del aparato hasta su borde exterior. Según la geometría que aprendimos en la escuela, resulta que su cociente es dos veces el número pi —aproximadamente 6,28— tal como sucede para cualquier circunferencia que dibujemos en una hoja de papel plana. Pero ¿cómo se ven las cosas desde la perspectiva de alguien que esté montado en el aparato?

Para averiguarlo, les pedimos a Slim y Jim, que en este momento están disfrutando de una vuelta en el Tornado, que nos hagan el favor de tomar algunas medidas. Le lanzamos una de nuestras reglas a Slim, que se pone en acción para medir la circunferencia del aparato, como se ve en la Figura 3.1. Hemos decorado esta especie de foto instantánea con una flecha que indica la dirección del movimiento en cada punto en el momento de hacer la foto. Cuando Slim empieza a medir la circunferencia, vemos inmediatamente desde nuestra perspectiva a vista de pájaro que va a obtener una respuesta diferente de la que obtuvimos nosotros. Cuando coloca la regla a lo largo de la circunferencia, observamos que *la longitud de la regla se ha acortado*.



Figura 3.1 La regla de Slim se contrae, porque está colocada en la dirección del movimiento del aparato. Sin embargo, la regla de Jim está colocada a lo largo de una viga radial, perpendicular a la dirección del movimiento del aparato, y en consecuencia su longitud no se contrae.

Esto no es otra cosa que la contracción de Lorentz que ya mencionamos en el capítulo 2, según la cual la longitud de un objeto se reduce en la dirección de su movimiento. Que la regla sea más corta significa que tendrá que colocarla más veces para recorrer toda la circunferencia. Dado que él sigue pensando que la longitud de la regla es treinta centímetros (como no hay movimiento relativo entre Slim y su regla, él la percibe con su longitud habitual de treinta centímetros), Slim medirá una circunferencia *más larga* que la que nosotros habíamos medido. (Si por casualidad usted se está preguntando: «¿Por qué no se contrae la circunferencia del mismo modo que la regla, con lo que Slim mediría la misma longitud que habíamos medido nosotros?», puede que le convenga leer la nota final).

¿Qué sucede con el radio? Pues que Jim utiliza el mismo sistema de la regla para hallar la longitud de una viga radial y, desde nuestra perspectiva a vista de pájaro, vemos que va a obtener la misma respuesta que nosotros. La razón es que la regla no apunta hacia la dirección instantánea del movimiento del aparato (a diferencia de lo que sucedía al medir la circunferencia). En este caso forma un ángulo de noventa grados con la dirección del movimiento, por lo que su longitud *no* se contrae. En consecuencia, Jim hallará exactamente la misma longitud radial que obtuvimos nosotros.

Sin embargo, cuando Slim y Jim calculen el cociente entre la longitud de la circunferencia del aparato y su radio, obtendrán un número mayor que dos veces pi (que era lo que habíamos obtenido nosotros), ya que la circunferencia es más larga,

mientras el radio mide lo mismo. Realmente es un misterio. ¿Cómo puede ser que algo que tiene forma de círculo contradiga el resultado obtenido por los antiguos griegos, según el cual en cualquier círculo este cociente es *exactamente* dos veces el número pi?

He aquí la explicación de Einstein. El resultado obtenido por los antiguos griegos es cierto para los círculos que se trazan en una superficie plana. Pero, del mismo modo que los espejos alabeados o curvos de una atracción de feria distorsionan las relaciones espaciales normales cuando nos reflejan, si un círculo se dibuja en una superficie alabeada o curva, sus relaciones espaciales habituales también quedarán distorsionadas: el cociente de su circunferencia dividida entre su radio *no* será, en general, dos veces el número pi.

Por ejemplo, la Figura 3.2 compara tres círculos cuyos radios son idénticos. Sin embargo, obsérvese que sus circunferencias *no* son iguales. La circunferencia del círculo representado en (b), dibujado en la superficie curva de una esfera, es menor que la circunferencia del círculo dibujado en la superficie plana representada en (a), aunque tienen el mismo radio. La naturaleza curva de la superficie de la esfera hace que las líneas radiales del círculo converjan ligeramente entre sí, de lo cual resulta una pequeña disminución en la longitud de la circunferencia. La circunferencia del círculo representado en (c), que también está dibujado sobre una superficie curva —con forma de silla de montar— es *mayor* que la que se dibuja en una superficie plana; la naturaleza curva de la superficie de la silla de montar hace que los espacios entre las líneas radiales del círculo se ensanchen hacia fuera ligeramente, con lo que se produce un pequeño aumento en la longitud de la circunferencia. Estas observaciones ponen de manifiesto, por lo tanto, que el cociente entre la longitud de la circunferencia y el radio de la misma en (b) será menor que dos veces el número pi, mientras que el mismo cociente en (c) será mayor que dos veces el número pi. Pero esta desviación con respecto a dos veces pi, especialmente el valor mayor hallado en el caso (c), es justo lo que habíamos obtenido para el Tornado que giraba. Esto indujo a Einstein a proponer un concepto —la curvatura del espacio— como explicación de esa contradicción con la geometría euclídea, es decir, la geometría «ordinaria». La geometría plana de los griegos, que se ha enseñado a los niños en la escuela durante miles de años, sencillamente no es aplicable a algo que se encuentra en un aparato que gira como el Tornado. En cambio, sí que procede aplicar su generalización al espacio curvo, como se representa esquemáticamente en el caso (c) de la Figura 3.4

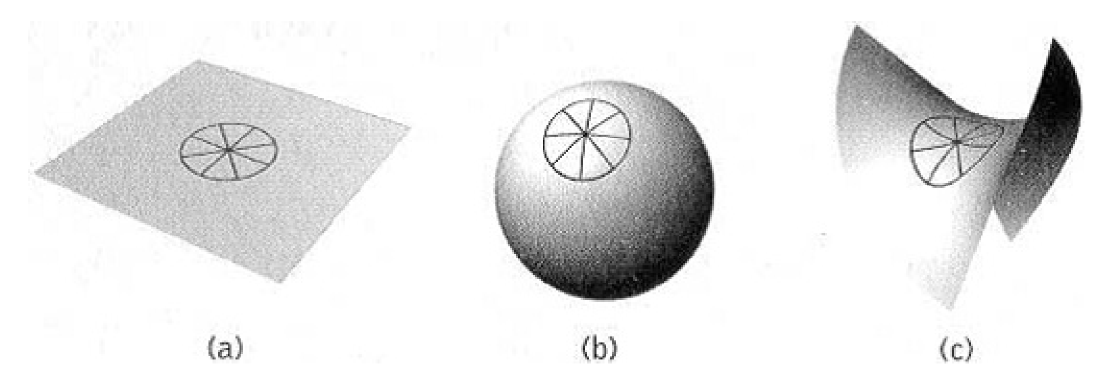


Figura 3.2 Un círculo dibujado sobre una esfera (b) tiene una circunferencia menor que uno que esté dibujado sobre una hoja plana de papel (a), mientras que un círculo dibujado sobre la superficie de una silla de montar (c) tiene una circunferencia mayor, aunque todos estos círculos tengan el mismo radio.[15]

Así fue como Einstein constató que las relaciones geométricas espaciales habituales codificadas por los griegos, relaciones que corresponden a figuras espaciales «planas» como el círculo trazado en una mesa plana, *no se cumplen* desde el punto de vista de un observador que sufre una aceleración en su movimiento. Por supuesto, nosotros sólo hemos hablado de un tipo particular de movimiento acelerado, pero Einstein demostró que en todos los casos de movimiento acelerado se produce una característica similar: el alabeo del espacio.

De hecho, el movimiento acelerado no sólo produce un alabeo del espacio, sino también un alabeo análogo del tiempo. (En la secuencia histórica, Einstein se centró primero en el alabeo del tiempo y posteriormente constató la importancia del alabeo del espacio.[16]) En cierto sentido, no debería resultar demasiado sorprendente que el tiempo se vea también afectado, puesto que ya vimos en el capítulo 2 que la relatividad especial articula una unión entre el espacio y el tiempo. Esta fusión quedó resumida en las poéticas palabras de Minkowski, quien en 1908, durante una conferencia sobre la relatividad especial, dijo: «De ahora en adelante el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo se desvanecen convirtiéndose en meras sombras, y sólo una cierta unión entre los dos mantendrá una independencia propia».[17] En un lenguaje más prosaico, pero igual de impreciso, entretejiendo el espacio y el tiempo en una estructura unificada de espacio-tiempo, la relatividad especial afirma: «Lo que es verdad para el espacio, lo es también para el tiempo». Sin embargo, esto plantea una pregunta: mientras que podemos representar el espacio alabeado dándole una forma curva, ¿qué es realmente lo que queremos decir cuando hablamos de tiempo alabeado?

Para hacernos una idea de cuál podría ser la respuesta, aprovechemos una vez más la situación de Slim y Jim en el aparato del Tornado y pidámosles que lleven a cabo el siguiente experimento. Slim estará en pie con su espalda colocada contra la pared del aparato, en el extremo de una de las vigas radiales del mismo, mientras que Jim avanzará hacia él gateando lentamente sobre la viga, partiendo del centro del

aparato. Cada pocos pasos, Jim se detendrá y los dos hermanos compararán la lectura que marcan sus relojes. ¿Qué resultados obtendrán? Desde nuestra perspectiva inmóvil y a vista de pájaro, podemos una vez más predecir la respuesta: sus relojes no coincidirán. Llegamos a esta conclusión porque constatamos que Slim y Jim se desplazan a velocidades diferentes: en el aparato del Tornado, cuanto más se haya avanzado a lo largo de una viga, más espacio se ha de recorrer para realizar una rotación completa, y en consecuencia se ha de girar a mayor velocidad. Pero, desde el punto de vista de la relatividad especial, cuanto mayor sea la velocidad del movimiento, más lentamente funciona el reloj, por lo que observamos que el reloj de Slim funcionará más despacio que el de Jim. Además, Slim y Jim constatarán que, cuanto más se acerque Jim a Slim, la velocidad del funcionamiento del reloj de Jim se verá frenada, acercándose cada vez más a la velocidad del de Slim. Esto refleja el hecho de que, a medida que Jim va más lejos a lo largo de la viga, su velocidad circular aumenta, acercándose cada vez más a la de Slim.

La conclusión a la que llegamos es que para unos observadores como Slim y Jim la velocidad del paso del tiempo depende de su posición exacta, en este caso, de su distancia al centro del aparato que gira. Es un ejemplo de lo que quiere decir tiempo alabeado: el tiempo está alabeado si la velocidad con que transcurre es diferente según la posición del observador. Además, lo que tiene una importancia especial para nuestra discusión del tema es que Jim también percibirá algo más cuando se desplaza gateando por la viga. Sentirá un tirón hacia fuera cada vez más fuerte, porque no sólo aumenta la velocidad, sino que también aumenta la aceleración cuanto más lejos se encuentre del centro del aparato que gira. Así pues, en el caso del Tornado vemos que una mayor aceleración está unida a una mayor lentitud en los relojes, es decir, una mayor aceleración produce un alabeo más significativo del tiempo.

Estas observaciones llevaron a Einstein al salto final. Dado que ya había demostrado que la gravedad y el movimiento acelerado son efectivamente indistinguibles y dado que, por último, había demostrado que el movimiento acelerado está asociado con el alabeo del espacio y del tiempo, formuló la siguiente proposición que habría de constituir las entrañas de la «caja negra» de la gravedad: el mecanismo mediante el cual la gravedad actúa. La gravedad, según Einstein, es el alabeo del espacio y el tiempo. Veamos qué significa esto.

Los fundamentos de la relatividad general

Para hacernos una idea de esta nueva forma de ver la gravedad, consideremos la

situación típica de un planeta, tal como la Tierra, que gira alrededor de una estrella, tal como el Sol. En la teoría de la gravedad de Newton el Sol mantiene a la Tierra en órbita asiéndola con una «atadura» que, de alguna forma, se extiende a través de vastas distancias en el espacio y agarra a la Tierra (y, de un modo similar, la Tierra alcanza y agarra al Sol). Einstein aportó una nueva manera de concebir lo que sucede realmente. El disponer de un modelo visual concreto de espacio-tiempo que podamos manipular convenientemente nos ayudará para la discusión del planteamiento de Einstein. Para ello simplificaremos las cosas de dos maneras. En primer lugar, por ahora, ignoraremos el tiempo y nos centraremos exclusivamente en un modelo visual del espacio. En breve volveremos a incorporar el tiempo a nuestra discusión. En segundo lugar, con el fin de poder dibujar y manipular imágenes visuales en las páginas de este libro, nos referiremos a menudo a un espacio bidimensional equivalente al espacio de tres dimensiones. La mayoría de las conclusiones que obtendremos pensando mediante este modelo de menos dimensiones es aplicable directamente en el marco físico tridimensional, por lo que este modelo más sencillo nos proporciona un poderoso instrumento pedagógico.

En la Figura 3.3, utilizamos estas simplificaciones y dibujamos un modelo bidimensional de una región espacial de nuestro universo. La estructura en forma de red cuadriculada proporciona un medio adecuado para especificar las posiciones, del mismo modo que una red de calles ofrece el modo de especificar ubicaciones en una ciudad. Por supuesto que en una ciudad damos una dirección indicando una ubicación en la red de calles bidimensional y otra también en dirección vertical, como es el número de piso. Es esta última información, la ubicación en la tercera dimensión espacial, la que suprimimos en nuestra analogía bidimensional con el fin de lograr claridad visual.

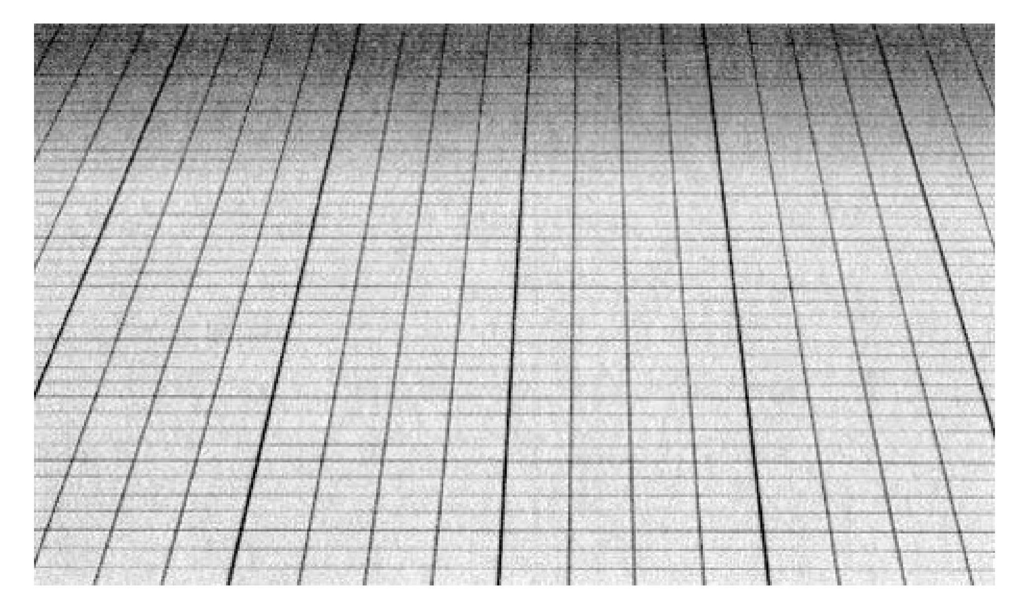


Figura 3.3 Una representación esquemática del espacio plano.

En ausencia de cualquier tipo de materia o energía, Einstein prevé que el espacio será *plano*. En nuestro modelo bidimensional, esto significa que la «forma» del espacio debería ser como la superficie de una mesa lisa, tal como se dibuja en la Figura 3.3. Es la imagen de nuestro universo espacial que hemos mantenido durante miles de años. Pero ¿qué le sucede al espacio si un objeto que posee masa, como el Sol, está presente? Antes de Einstein la respuesta era *nada*: se consideraba que el espacio (y el tiempo) proporcionaban un escenario inerte, constituyendo simplemente el marco en el que se desarrollan por sí mismos los acontecimientos del universo. La línea de razonamiento de Einstein que hemos estado siguiendo hasta ahora, sin embargo, nos lleva a una conclusión diferente.

Un cuerpo que posee masa, como el Sol, y de hecho cualquier cuerpo, ejerce una fuerza gravitatoria sobre otros objetos. En el ejemplo de la bomba terrorista, aprendimos que las fuerzas gravitatorias son indistinguibles del movimiento acelerado. En el ejemplo del aparato del Tornado, aprendimos que una descripción matemática del movimiento acelerado *requiere* de las relaciones del espacio curvo. Estos vínculos entre la gravedad, el movimiento acelerado y el espacio curvo condujeron a Einstein a formular una importante sugerencia, según la cual la presencia de una masa, como la del Sol, es la causa de que la estructura del espacio que la rodea se *curve*, como se muestra en la Figura 3.4. Una analogía muy útil, y a menudo citada, es que, al igual que sucede con una membrana de goma donde se ha colocado una bola de *bowling*, la estructura del espacio se distorsiona a causa de la presencia de un objeto que posee masa, como es el Sol.

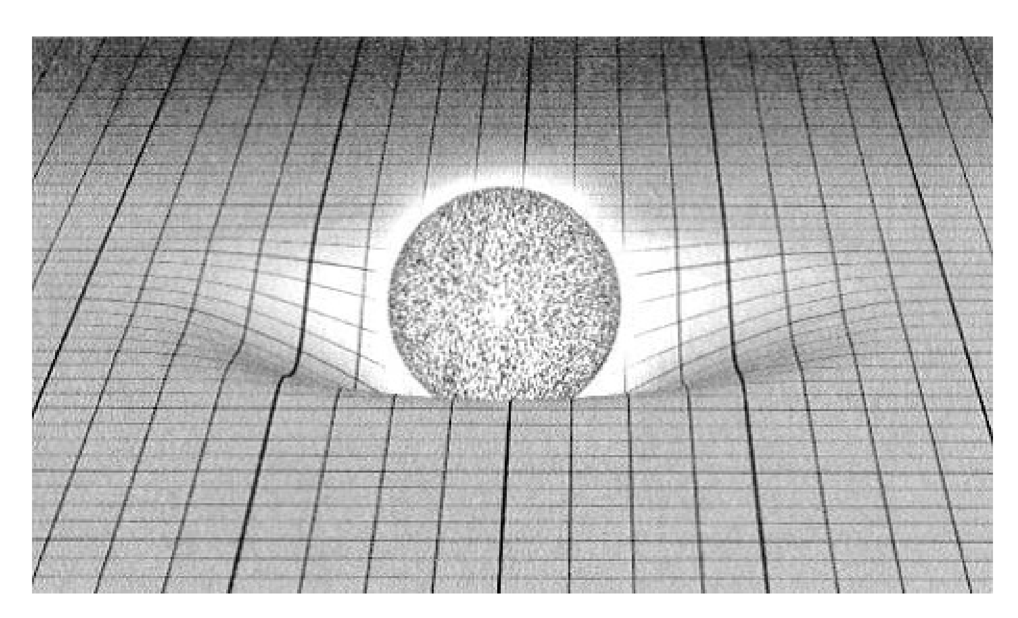


Figura 3.4 Un cuerpo masivo, como el Sol, hace que la estructura del espacio se curve, en cierto modo igual que el efecto de una bola de bowling colocada sobre una membrana de goma.

Según esta propuesta radical, el espacio no es meramente un escenario pasivo que proporciona el marco para los acontecimientos del universo, sino que la forma de ese

espacio *responde* a los objetos que estén en su entorno.

A su vez, este alabeo afecta a otros objetos que se mueven en la proximidad del Sol, puesto que deben atraer esa estructura espacial distorsionada. Utilizando la analogía de la membrana de goma y la bola de bowling, si ponemos un pequeño cojinete de bolas sobre la membrana y lo ponemos en movimiento con una cierta velocidad inicial, la ruta que seguirá depende de que la bola esté colocada en el centro o no. Si la bola no está, la membrana de goma estará plana y el cojinete de bolas recorrerá una línea recta. Si la bola está presente, y por consiguiente alabea la membrana, el cojinete de bolas se moverá recorriendo una línea curva. De hecho, si ignoramos el rozamiento y ponemos el cojinete de bolas en movimiento justo con la velocidad y la dirección adecuadas, éste continuará moviéndose en un recorrido curvo recurrente alrededor de la bola de bowling; en realidad, lo que hará será «ponerse en órbita». Este modo de decirlo ya hace presagiar la aplicación de esta analogía a la gravedad.

El Sol, como la bola de bowling, alabea la estructura del espacio que lo rodea, y el movimiento de la Tierra, como el de la bola de rulemán, está determinado por la forma del espacio alabeado. La Tierra, al igual que la bola de rulemán, se moverá describiendo una órbita alrededor del Sol si su velocidad y su orientación tienen los valores adecuados. Este efecto sobre el movimiento de la Tierra es lo que denominaríamos normalmente influencia gravitatoria del Sol, y está ilustrado en la Figura 3.5. Sin embargo, la diferencia con respecto a los trabajos de Newton es que Einstein especificó el *mecanismo* por el cual se transmite la gravedad: el alabeo del espacio. En la teoría de Einstein, la atadura gravitatoria que mantiene a la Tierra en órbita no es alguna misteriosa acción instantánea del Sol, sino el alabeo de la estructura del espacio que se produce debido a la presencia del Sol.

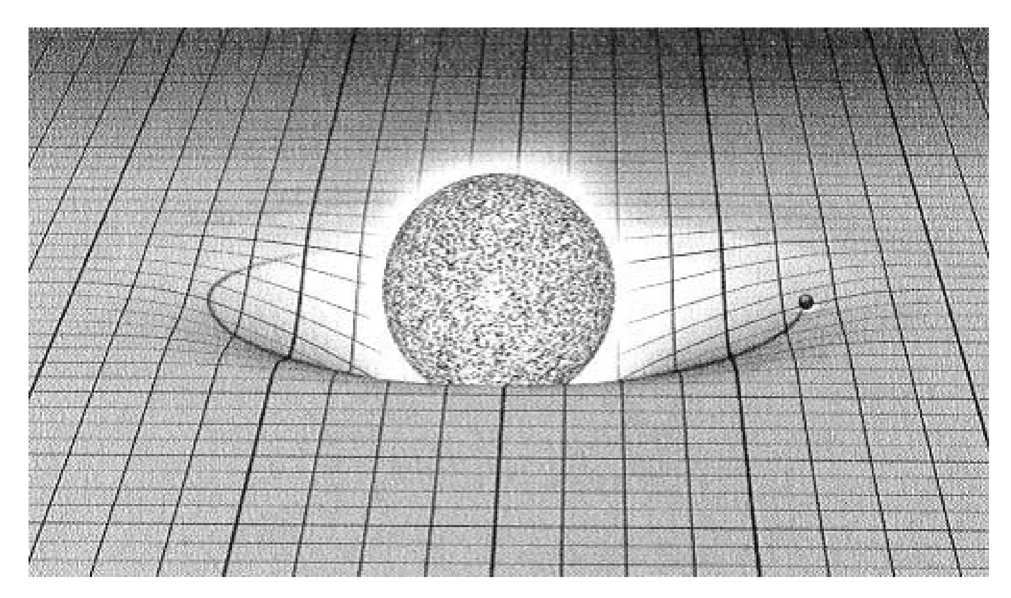


Figura 3.5 La Tierra se mantiene en órbita alrededor del Sol porque rueda por un valle situado en la estructura curvada del espacio. Dicho de una manera más precisa, recorre una «trayectoria de resistencia mínima» en la región distorsionada que rodea al Sol.

Este dibujo nos permite entender las dos características esenciales de la gravedad de un nuevo modo. Primero, cuanto más masiva sea la bola de bowling, más grande será la distorsión que cause en la membrana de goma; similarmente, en la descripción de la gravedad de Einstein cuanto más masivo sea un objeto, más grande será la distorsión que cause en el espacio que le rodea. Esto implica que cuanto más masivo es un objeto, más grande es la influencia gravitacional que puede ejercer sobre otros cuerpos, precisamente de acuerdo con nuestras experiencias. Segundo, tal como la distorsión de la membrana de goma debido a la bola de bowling se achica cuando uno se aleja de ella, el monto de curvatura espacial debida a un cuerpo masivo tal como el Sol decrece cuando nuestra distancia de él se incrementa. Esto, nuevamente, concuerda con nuestra comprensión de la gravedad, cuya influencia se vuelve más débil cuando la distancia entre los objetos se vuelve más grande.

Una cuestión importante que conviene tener en cuenta es que la propia bola de rulemán también hace que la membrana de goma se alabee, aunque sólo ligeramente. De una manera similar, la Tierra, por ser ella misma un cuerpo provisto de masa, hace asimismo que la estructura del espacio se alabee, aunque su influencia es mucho menor que la del Sol. Éste es el modo en que, en el lenguaje de la relatividad general, la Tierra mantiene a la Luna en órbita, y también nos mantiene a nosotros ligados a su superficie. Cuando un o una paracaidista salta del avión y desciende, está deslizándose hacia abajo por una depresión de la estructura del espacio causada por la masa de la Tierra. Además, cada uno de nosotros —como cualquier objeto con masa — también alabeamos la estructura del espacio en un entorno cercano a nuestros cuerpos, aunque la masa de un ser humano, que comparativamente es muy pequeña, no produce más que una muesca minúscula.

Resumiendo entonces, Einstein coincidió plenamente con la afirmación de Newton según la cual «La gravedad debe estar causada por un agente» y aceptó el reto de Newton, que decía que dejaba la identidad del agente «a la consideración de mis lectores». El agente causante de la gravedad es, según Einstein, la estructura del cosmos.

Algunas advertencias

La analogía de la membrana de goma y la bola de bowling es válida porque nos da una imagen visual mediante la cual podemos comprender de una manera tangible lo que significa un alabeo en la estructura espacial del universo. Los físicos utilizan a menudo esta y otras analogías similares como guía para utilizar la intuición con

respecto a la gravedad y la curvatura. Sin embargo, a pesar de su utilidad, la analogía de la membrana de goma y la bola no es perfecta, por lo que, para mayor claridad, vamos a poner de relieve algunos de sus defectos.

En primer lugar, cuando el Sol hace que la estructura del espacio que lo rodea se alabee, esto no se debe a que la gravedad «tire de él hacia abajo», como sucede en el caso de la bola, que alabea la membrana de goma porque la gravedad tira de ella hacia la tierra. En el caso del Sol, no hay ningún otro objeto que «realice la acción de tirar de él». Lo que Einstein nos ha enseñado al respecto es que el propio alabeo del espacio *es* la gravedad. La mera presencia de un objeto dotado de masa hace que el espacio responda alabeándose. De manera análoga, no es que la Tierra se mantenga en órbita porque el tirón gravitatorio de algún otro objeto externo la guíe por los valles del entorno espacial alabeado, como ocurre con el cojinete de bolas que está sobre la membrana de goma alabeada. Al contrario, Einstein demostró que los objetos se mueven a través del espacio (más exactamente, a través del espacio-tiempo) recorriendo los caminos más cortos posibles, los «caminos más fáciles que sean posibles» o los «caminos de menor resistencia». Si el espacio está alabeado, estos caminos serán curvos. Por lo tanto, aunque el modelo de la membrana de goma y la bola proporcionan una buena analogía visual de cómo un objeto tal como el Sol alabea el espacio que lo rodea y de esta manera influye en el movimiento de otros cuerpos, sin embargo el mecanismo físico mediante el cual estas distorsiones se producen es totalmente diferente. El primer caso, el de la analogía, apela a nuestra intuición sobre la gravedad dentro del marco tradicional de la teoría de Newton, mientras que el último, el del mecanismo físico, expresa una reformulación de la gravedad en términos de espacio curvado.

Un segundo defecto de la analogía se deriva del hecho de que la membrana de goma es bidimensional. En la realidad, aunque sea más difícil de visualizar, el Sol (y todos los demás objetos dotados de masa) alabean el espacio tridimensional que los rodea. La Figura 3.6 es un intento de reflejar esto aproximadamente; *todo* el espacio que rodea al Sol —«debajo», «a los lados», sobre «la parte superior»— sufre el mismo tipo de distorsión, y la Figura 3.6 ofrece esquemáticamente una muestra parcial. Un cuerpo, como la Tierra, viaja *a través* del entorno espacial tridimensional alabeado ocasionado por la presencia del Sol. Puede que el lector encuentre esta figura preocupante: ¿por qué la tierra no se estrella contra la «parte vertical» del espacio curvo que se ve en la imagen? Sin embargo, hay que tener en cuenta que el espacio, a diferencia de la membrana de goma, no es una barrera sólida. Al contrario, las rejillas alabeadas de la imagen no son sino un par de finas rebanadas que atraviesan la totalidad del espacio tridimensional alabeado en el que nosotros, la Tierra y todo lo demás estamos inmersos por completo y en el que nos movemos libremente. Quizá piense el lector que esto no hace sino poner el problema más

difícil: ¿por qué no *sentimos* el espacio si estamos inmersos dentro de su estructura? Sí que lo sentimos. Sentimos la gravedad, y el espacio es el medio por el cual se comunica la fuerza gravitatoria. Como ha dicho a menudo el eminente físico John Wheeler al describir la gravedad, «la masa agarra el espacio diciéndole cómo ha de curvarse, y el espacio agarra la masa diciéndole cómo ha de moverse».[18]

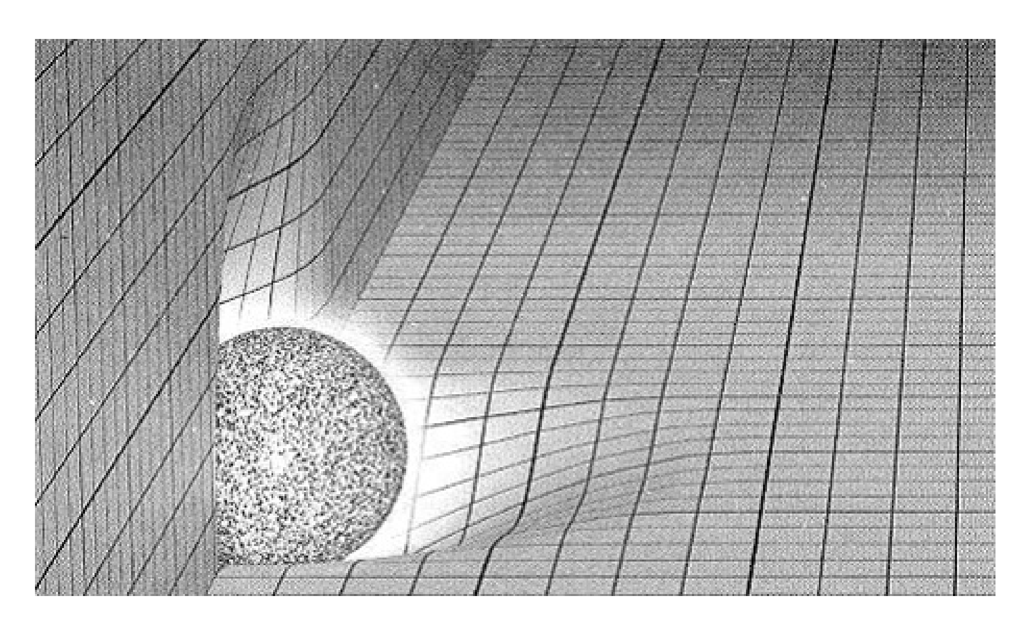


Figura 3.6 Una muestra del espacio curvado tridimensional que rodea al Sol.

Un tercer defecto de la analogía es que hemos suprimido la dimensión temporal. Lo hemos hecho para conseguir claridad visual, porque, a pesar de que la relatividad especial afirma que deberíamos tener en cuenta la dimensión temporal a la par de las tres dimensiones espaciales habituales, es significativamente más difícil «ver» el tiempo. No obstante, como se aclara en el ejemplo del aparato del Tornado, la aceleración —y por consiguiente la gravedad— alabea *tanto el espacio como el tiempo*. (De hecho, las matemáticas de la relatividad general muestran que en el caso de un cuerpo que se mueve relativamente despacio, como la Tierra, girando en torno a una estrella típica, como el Sol, el alabeo del tiempo tiene realmente en el movimiento de la Tierra un impacto mucho más significativo que el alabeo del espacio). Después de la próxima sección volveremos a hablar del alabeo del tiempo.

Aunque estos tres defectos sean importantes, siempre que los tengamos en cuenta es perfectamente aceptable reproducir la imagen del espacio alabeado utilizando la bola de bowling colocada sobre una membrana de goma con el fin de resumir intuitivamente la nueva visión de la gravedad propuesta por Einstein.

La resolución del conflicto

Mediante la introducción del espacio y el tiempo como protagonistas activos, Einstein aportó una clara imagen conceptual de cómo funciona la gravedad. Sin embargo, la cuestión fundamental es si esta reformulación de la fuerza de la gravedad resuelve el conflicto con la relatividad especial que afecta a la teoría de la gravedad de Newton. Sí lo resuelve. Una vez más, la analogía de la membrana de goma nos da la idea esencial. Supongamos que tenemos una bola de rulemán que rueda siguiendo una línea recta a lo largo de la membrana plana en ausencia de la bola de jugar a los bolos. Cuando colocamos la bola sobre la membrana, el movimiento de la bola se verá afectado, pero *no instantáneamente*. Si filmáramos esta secuencia de sucesos y la pasáramos a cámara lenta, veríamos que la perturbación causada por la introducción de la bola se transmite como las ondulaciones en un charco de agua y alcanza finalmente la posición de la bola de rulemán. Después de un breve tiempo, las oscilaciones transitorias producidas en la superficie de goma se estabilizarían, dejándonos una membrana estática alabeada.

Lo mismo sucede con la estructura del espacio. Cuando no hay una masa presente, el espacio es plano y cualquier pequeño objeto estará inmóvil o se desplazará a una velocidad constante. Si entra en escena una gran masa, el espacio se alabeará pero, como en el caso de la membrana, esta distorsión no será instantánea, sino que se extenderá hacia fuera desde el cuerpo dotado de masa, estabilizándose finalmente en una forma alabeada que transmitirá el tirón gravitatorio del cuerpo recién llegado. En nuestra analogía, las perturbaciones que sufre la membrana de goma se desplazan por toda su extensión a una velocidad que estará determinada por su composición material concreta. En la versión real de la relatividad general, Einstein pudo calcular a qué velocidad viajan las perturbaciones de la estructura del universo, *precisamente a la velocidad de la luz*. Esto significa, entre otras cosas, que en el ejemplo hipotético que hemos discutido anteriormente en el que la desaparición del Sol afecta a la Tierra en virtud de los cambios que se producirían en su atracción gravitatoria mutua, la influencia no se transmitiría instantáneamente. Al contrario, cuando un objeto cambia de posición o incluso estalla en pedazos, produce un cambio en la distorsión de la estructura del espacio-tiempo que se difunde al exterior a la velocidad de la luz, precisamente coincidiendo con el límite de velocidad cósmico establecido por la relatividad especial. Así, los que estamos en la Tierra nos enteraríamos visualmente de la destrucción del Sol en el mismo momento en que sintiéramos las consecuencias gravitatorias —unos ocho minutos después de que explotara—. Por lo tanto, la formulación de Einstein resuelve el conflicto; las perturbaciones gravitatorias caminan al mismo paso que los fotones, pero nunca los adelantan.

El alabeo del tiempo, una vez más

Las Figuras 3.2, 3.4 y 3.6 muestran ilustraciones que captan la esencia de lo que significa un «espacio alabeado». Un alabeo distorsiona la forma del espacio. Algunos físicos han ideado imágenes análogas intentando expresar el significado del «tiempo alabeado», pero son mucho más difíciles de descifrar, por lo que no las vamos a presentar aquí. En vez de eso, sigamos con el ejemplo de Slim y Jim en el aparato del Tornado e intentemos comprender la experiencia del tiempo alabeado inducido por la gravedad.

Para esto, visitamos de nuevo a George y Gracie, que ya no están en las profundas oscuridades del espacio vacío, sino flotando en las proximidades del sistema solar. Cada uno de ellos sigue llevando un gran reloj digital en su traje espacial, y ambos relojes se han sincronizado inicialmente. Para hacer las cosas más sencillas, ignoraremos los efectos producidos por la presencia de los planetas y sólo consideraremos el campo gravitatorio generado por el Sol. Supongamos, además, que una nave espacial anda rondando cerca de George y Gracie y ha desenrollado un largo cable que llega hasta la proximidad de la superficie solar. George utiliza este cable para descender lentamente hacia el Sol. Mientras lo hace, realiza paradas periódicas de tal manera que Gracie y él pueden comparar la velocidad a la que transcurre el tiempo en sus relojes. El alabeo del tiempo predicho por la teoría de la relatividad general de Einstein implica que el reloj de George ha de funcionar cada vez más lentamente en comparación con el de Gracie a medida que el campo gravitatorio al que está sometido se hace más y más fuerte. Es decir, cuanto más cerca del Sol se sitúa, más lentamente funcionará su reloj. En este sentido es como entendemos que la gravedad distorsiona el tiempo, a la vez que distorsiona el espacio.

Hay que tener en cuenta que, a diferencia del caso visto en el capítulo 2 en el que George y Gracie estaban en el espacio vacío moviéndose relativamente el uno con respecto al otro con velocidad constante, en el caso actual no hay simetría entre ellos. George, a diferencia de Gracie, *siente* la fuerza de la gravedad que se vuelve cada vez más fuerte —ha de agarrarse al cable cada vez con mayor fuerza a medida que se acerca al Sol para evitar ser arrastrado—. Ambos coinciden en considerar que el reloj de George atrasa. No hay una «perspectiva igualmente válida» que intercambie sus papeles e invierta esta conclusión. Esto es, de hecho, lo que concluimos en el capítulo 2, cuando George experimentaba una aceleración para alcanzar a Gracie. La aceleración que percibía George dio como resultado que su reloj definitivamente atrasara en comparación con el de Gracie. Dado que ahora sabemos que percibir un movimiento acelerado es lo mismo que percibir una fuerza gravitatoria, la situación actual de George agarrado al cable se basa en el mismo principio, y una vez más vemos que el reloj de George, y todo lo demás en su vida, funciona lentamente en

comparación con el reloj de Gracie.

En un campo gravitatorio como el que existe en la superficie de una estrella corriente como el Sol, el atraso que experimentan los relojes es bastante pequeño. Si Gracie se encuentra, por ejemplo, a unos mil seiscientos millones de kilómetros del Sol, entonces cuando George está a unos pocos kilómetros de su superficie, la velocidad del tictac de su reloj será alrededor del 99,9998 por 100 de la velocidad del de Gracie. Va más lento, pero no mucho más.[19] Sin embargo, si George desciende por un cable hasta quedarse suspendido sobre la superficie de una estrella de neutrones cuya masa, aproximadamente igual a la del Sol, está comprimida hasta tener una densidad de más o menos mil billones de veces la del Sol, este campo gravitatorio será mayor y hará que su reloj funcione a aproximadamente un 76 por 100 de la velocidad del de Gracie. Los campos gravitatorios que son más fuertes, como el que se encuentra justo en el exterior de un agujero negro (como se comentará más adelante), hacen que el flujo del tiempo sea aún más lento; los campos gravitatorios más fuertes producen un alabeo del tiempo más acusado.

Verificación experimental de la relatividad general

La mayoría de las personas que estudian la relatividad general se queda cautivada por su elegancia estética. Al reemplazar la fría y mecánica visión del espacio, el tiempo y la gravedad que nos daba Newton, por una descripción dinámica y geométrica que incluye un espacio-tiempo curvo; Einstein incorporó la gravedad a la estructura básica del universo. La gravedad no se impone como una estructura adicional, sino que se convierte en una parte del universo al nivel más fundamental. Insuflar vida al espacio y al tiempo, permitiendo que se curven, alabeen y ondulen, da como resultado lo que comúnmente llamamos gravedad.

Dejando a un lado la estética, la prueba definitiva de una teoría física es su capacidad de explicar y predecir los fenómenos físicos con exactitud. Desde su aparición a finales del siglo XVII hasta el comienzo del siglo XX, la teoría de la gravedad de Newton pasó esta prueba airosamente. Tanto si se aplicaba al lanzamiento de pelotas al aire, a objetos que caían de torres inclinadas, a cometas que giraban alrededor del Sol, o a planetas que recorrían sus órbitas solares, la teoría de Newton proporcionaba unas explicaciones extremadamente precisas de todas las observaciones y predicciones que se han verificado innumerables veces en una gran variedad de situaciones. Como ya hemos dicho, el motivo por el que se puso en cuestión una teoría que experimentalmente había tenido tanto éxito fue su propiedad

de transmitir instantáneamente la fuerza de la gravedad, lo cual entraba en conflicto con la relatividad especial.

Los efectos de la relatividad especial, aunque son imprescindibles para comprender los fundamentos del espacio, el tiempo y el movimiento, son extremadamente pequeños en el mundo de bajas velocidades en el que nos desenvolvemos habitualmente. De manera análoga, las discrepancias entre la relatividad general de Einstein —una teoría de la gravedad compatible con la relatividad especial— y la teoría de la gravedad de Newton son también extremadamente pequeñas en la mayoría de las situaciones corrientes. Esto es al mismo tiempo bueno y malo. Es bueno porque es preferible que cualquier teoría que pretenda suplantar la teoría de la gravedad de Newton coincida exactamente con ella cuando se aplique en aquellos terrenos en que la teoría de Newton ya ha sido verificada mediante experimentos. Es malo porque hace difícil decidir entre una de las dos teorías experimentalmente. Para poder distinguir entre las teorías de Newton y Einstein se requieren unas mediciones extremadamente precisas aplicadas a experimentos que son muy sensibles a los modos en que las dos teorías difieren. Si lanzamos una pelota de béisbol, la gravedad de Newton y la de Einstein se pueden utilizar para predecir dónde aterrizará la pelota y las respuestas serán diferentes, pero las diferencias serán tan pequeñas que estarán en general más allá de nuestra capacidad de detectarlas experimentalmente. Se hace necesario realizar un experimento más inteligente, y Einstein propuso uno.[20]

Vemos estrellas por la noche, pero, por supuesto, también están ahí durante el día. Normalmente no las vemos porque su luz distante y puntual se ve superada por la luz emitida por el Sol. Sin embargo, durante un eclipse solar, la luna bloquea temporalmente la luz del Sol y las estrellas distantes se vuelven visibles. No obstante, la presencia del Sol tiene además otro efecto. La luz proveniente de algunas estrellas distantes debe pasar cerca del Sol cuando recorre su camino hacia la Tierra. La relatividad general de Einstein predice que el Sol hará que el espacio y el tiempo que lo rodean se alabeen y esta distorsión *ejercerá una influencia* sobre la trayectoria que toma la luz de estas estrellas. Después de todo, los fotones que se originan en puntos tan distantes viajan atravesando la estructura del universo; si esta estructura está alabeada, el movimiento de los fotones se verá afectado más o menos de la misma manera que el de un cuerpo provisto de materia. La desviación de la trayectoria de la luz es mayor para las señales luminosas que llegan a rozar el Sol en su camino hacia la Tierra. Un eclipse solar hace posible ver esa luz estelar que roza el Sol sin que quede totalmente oscurecida por la propia luz del Sol.

El ángulo de desviación de la trayectoria de la luz se puede medir de un modo sencillo. La desviación de la trayectoria de la luz estelar produce un desplazamiento en la posición aparente de la estrella. Este desplazamiento se puede medir con

exactitud comparando su posición *aparente* con la posición *real* de la estrella, que se conoce a partir de las observaciones realizadas de noche (en ausencia de la influencia alabeadora del Sol), llevadas a cabo cuando la Tierra está en una posición adecuada, unos seis meses antes o después. En noviembre de 1915, Einstein utilizó su nueva forma de entender la gravedad para calcular el ángulo de desviación de las señales estelares luminosas que rozan el Sol y vio que la respuesta era aproximadamente 49 cienmilésimas (0,00049) de grado (1,75 segundos de arco, siendo el segundo de arco 1/3600 de un grado). Este ángulo diminuto es aproximadamente igual al que subtiende una moneda de cuarto de dólar colocada en posición vertical y vista desde una distancia de algo más de tres kilómetros. La detección de un ángulo tan pequeño ya estaba, sin embargo, al alcance de la tecnología de aquella época. A requerimiento de sir Frank Dyson, director del observatorio de Greenwich, sir Arthur Eddington, conocido astrónomo y secretario de la *Royal Astronomical Society* en Inglaterra, organizó una expedición a la isla de Santo Tomé y Príncipe, situada frente a la costa occidental de África, para comprobar la predicción de Einstein durante el eclipse solar del 29 de mayo de 1919.

El 6 de noviembre de 1919, tras unos cinco meses analizando las fotografías tomadas durante el eclipse en la isla de Santo Tomé y Príncipe (así como otras fotografías del mismo eclipse tomadas por un segundo equipo británico dirigido por Charles Davidson y Andrew Crommelin en Sobral, Brasil), se anunció en una reunión conjunta de la *Royal Society* y la *Royal Astronomical Society* que la predicción de Einstein basada en la relatividad general había quedado confirmada. La noticia de este éxito —una revolución completa de los conceptos previos relativos al espacio y al tiempo— tardó poco en extenderse hasta mucho más allá de los confines de la comunidad de expertos en física, convirtiendo a Einstein en una figura célebre a nivel mundial. El 7 de noviembre de 1919, los titulares del *Times* de Londres decían: «REVOLUCIÓN EN LA CIENCIA - NUEVA TEORÍA DEL UNIVERSO - LOS CONCEPTOS NEWTONIANOS DESBARATADOS».[21] Éste fue el momento de gloria de Einstein.

Durante los años siguientes a este experimento, la confirmación de Eddington de la relatividad general fue sometida a algunos exámenes críticos. Debido a los numerosos aspectos difíciles y sutiles de la medición, resultaba complicado reproducirla, y se plantearon algunas preguntas relativas a la fiabilidad del experimento original. Sin embargo, durante los últimos cuarenta años, una serie de experimentos que han utilizado los avances tecnológicos disponibles en cada momento, han comprobado numerosos aspectos de la relatividad general con una gran precisión. Las predicciones de la teoría de la relatividad general han quedado uniformemente confirmadas. Ya no hay ninguna duda de que la descripción de la gravedad realizada por Einstein, no sólo es compatible con la relatividad especial,

sino que proporciona unas predicciones más cercanas a los resultados experimentales que las de la teoría de Newton.

Agujeros negros, el big bang y la expansión del espacio

Mientras que la relatividad especial se pone de manifiesto en un grado máximo cuando los objetos se mueven rápido, la relatividad general alcanza sus mejores momentos cuando los objetos tienen mucha masa y los alabeos en el espacio y el tiempo son consecuentemente importantes. Pongamos dos ejemplos.

El primero es un descubrimiento realizado por el astrónomo alemán Karl Schwarzschild mientras estudiaba las afirmaciones de Einstein sobre la gravedad en relación con sus propios cálculos de las trayectorias de los proyectiles de artillería en el frente ruso en 1916, durante la Primera Guerra Mundial. Cosa notable, sólo unos meses después de que Einstein diera los últimos toques a la relatividad general, Schwarzschild era ya capaz de aplicar esta teoría para lograr una comprensión completa y exacta del modo en que el espacio y el tiempo se alabean en la proximidad de una estrella perfectamente esférica. Schwarzschild envió los resultados obtenidos en el frente ruso a Einstein, el cual los presentó en nombre de Schwarzschild a la Academia Prusiana.

Más allá de confirmar y precisar matemáticamente el alabeo, que ilustrábamos en la Figura 3.5, el trabajo de Schwarzschild —que actualmente se conoce como «solución de Schwarzschild»— revelaba una asombrosa consecuencia de la relatividad general. Demostraba que, si la masa de una estrella está concentrada en una región esférica suficientemente pequeña, de tal modo que la masa de la estrella dividida por su radio supere un valor crítico determinado, el alabeo resultante en el espacio-tiempo es tan pronunciado que *ningún objeto*, incluida la luz, que se acerque demasiado a la estrella podrá escapar de su atracción gravitatoria. Dado que ni siquiera la luz puede escapar de unas estrellas tan «comprimidas», éstas se llamaron inicialmente *estrellas oscuras* o *congeladas*. Años más tarde, John Wheeler acuñó un nombre más sonoro y atractivo, llamándolas *agujeros negros* —la denominación «negros» se debe a que no pueden emitir luz y «agujeros» porque cualquier objeto que se acerque demasiado cae en su interior, para no salir de allí jamás—. El nombre prendió.

En la Figura 3.7 ilustramos la solución de Schwarzschild. Aunque los agujeros negros tienen fama de voraces, los objetos que pasan junto a ellos a una distancia «segura» son desviados prácticamente del mismo modo que lo serían al pasar cerca

de cualquier estrella corriente y pueden continuar alegremente su camino. Pero los objetos, sea cual sea su composición, que se acercan demasiado —más cerca de lo que se ha dado en denominar *horizonte de sucesos* del agujero negro— sufren un destino funesto: son atraídos inexorablemente hacia el centro del agujero negro y sometidos a una fuerza gravitatoria que crece cada vez más, hasta acabar siendo destructiva. Por ejemplo, si usted cae de pie atravesando el horizonte de sucesos, se sentirá cada vez más incómodo a medida que se vaya acercando al centro del agujero negro. La fuerza gravitatoria del agujero negro crecerá tan rápidamente que el tirón que produce en sus pies será mucho más fuerte que el que produce en su cabeza; de hecho, la diferencia llegará a ser tan grande que su cuerpo se verá estirado con una fuerza tal que rápidamente acabará hecho jirones.

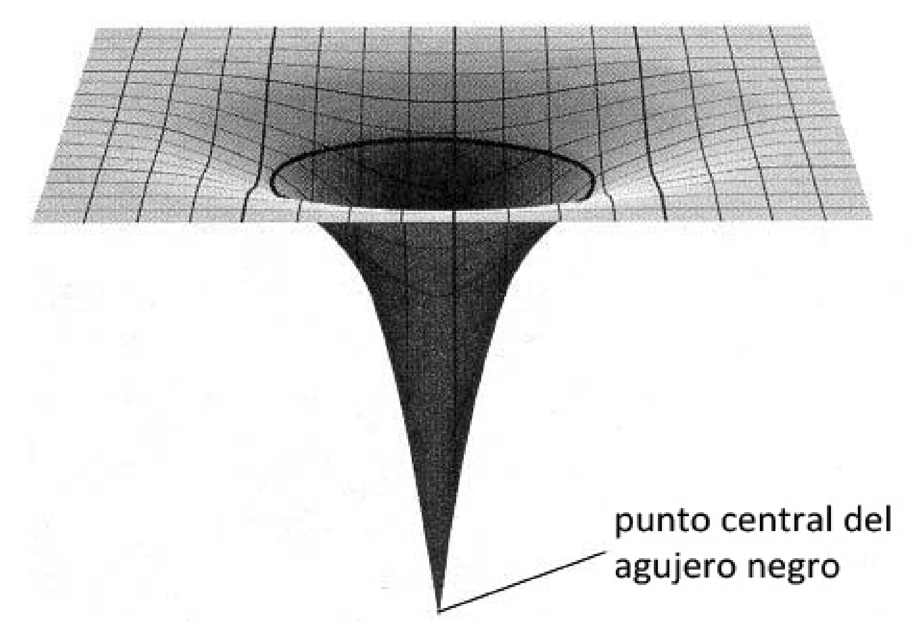


Figura 3.7 Un agujero negro hace que la estructura del espacio-tiempo que lo rodea se curve de una manera tan pronunciada que cualquier objeto que entra en el «horizonte de sucesos» —representado mediante el círculo oscuro— no puede escapar de su atracción gravitatoria. Nadie sabe exactamente qué es lo que sucede en el punto más profundo del interior de un agujero negro.

Si, por el contrario, usted fuera más prudente cuando pasea cerca de un agujero negro, y tuviera mucho cuidado para no traspasar el horizonte de sucesos, podría utilizar el agujero negro para realizar una prueba realmente emocionante. Supongamos, por ejemplo, que ha descubierto un agujero negro cuya masa es alrededor de mil veces la del Sol, y que usted va a descender por un cable, como hizo George en las proximidades del Sol, hasta situarse más o menos a unos tres centímetros por encima del horizonte de sucesos de este agujero negro. Como ya hemos dicho, los campos gravitatorios producen un alabeo del tiempo, lo cual significa que para usted el paso a través del tiempo se hará más lento. En efecto, puesto que los agujeros negros poseen unos campos gravitatorios tan fuertes, su paso por el tiempo se hará muchísimo más *lento*. Su reloj funcionará unas diez mil veces

más despacio que los de sus amigos que estén en la Tierra. Si estuviera usted flotando de esta manera, justo por encima del horizonte de sucesos del agujero negro durante un año, y luego trepara por el cable volviendo a la nave espacial que le está esperando para regresar a casa en un viaje breve, pero pausado, al llegar a la Tierra se encontraría con que habían transcurrido más de diez mil años desde que usted partió. Así, habría conseguido utilizar el agujero negro como una especie de máquina del tiempo que le habría permitido viajar a un distante futuro en la Tierra.

Para hacemos una idea de lo extremadamente grandes que son las magnitudes que aquí intervienen, una estrella con la masa del Sol sería un agujero negro si su radio no fuera el valor real del radio del Sol (unos 724.000 kilómetros), sino tan sólo unos 3 kilómetros o menos. Imagíneselo: todo el Sol prensado para encajar holgadamente sobre Manhattan. Una cucharadita de este Sol comprimido pesaría aproximadamente lo mismo que la montaña del Everest. Para convertir a la Tierra en un agujero negro necesitaríamos comprimirla dentro de una esfera cuyo radio fuera menos de un centímetro y medio. Durante mucho tiempo, los físicos fueron escépticos con respecto a la existencia real de unas configuraciones de la materia tan extremas, y muchos pensaron que los agujeros negros no eran más que un reflejo de la imaginación febril de los teóricos.

No obstante, durante la última década se ha ido acumulando un conjunto cada vez más amplio de pruebas experimentales relativas a la existencia de los agujeros negros. Evidentemente; dado que son negros, no pueden observarse directamente barriendo el cielo con los telescopios. En vez de eso, los astrónomos buscan agujeros negros detectando comportamientos anómalos en otras estrellas emisoras de luz más corrientes que pueden estar situadas justo fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro. Por ejemplo, cuando el gas y el polvo de las capas exteriores de estrellas corrientes caen hacia el horizonte de sucesos de un agujero negro, se aceleran hasta alcanzar casi la velocidad de la luz. A estas velocidades, la fricción que se produce dentro del torbellino de materia que cae en remolinos hacia abajo, genera una enorme cantidad de calor que hace que la mezcla de polvo y gas se ponga «incandescente», emitiendo luz visible y rayos X. Puesto que esta radiación se produce justamente en el exterior del horizonte de sucesos, puede escapar del agujero negro y viajar a través del espacio, con lo que es posible observarla y estudiarla directamente. La relatividad general proporciona unas predicciones detalladas sobre las propiedades que tendrán estas emisiones de rayos X; la observación de estas propiedades predichas aporta pruebas contundentes, aunque indirectas, de la existencia de agujeros negros. Por ejemplo, una cantidad cada vez mayor de pruebas indica que existe un agujero negro de gran masa —aproximadamente dos millones y medio de veces la masa del Sol— situado en el centro de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Además, hay que decir que incluso este agujero negro, aparentemente

gigantesco, se queda pequeño si lo comparamos con los que los astrónomos creen que existen en el núcleo de los quásares asombrosamente luminosos que están diseminados por el cosmos: agujeros negros cuyas masas pueden ser *miles de millones* de veces la del Sol.

Schwarzschild murió sólo unos pocos meses después de encontrar la solución que lleva su nombre. Tenía cuarenta y dos años y su muerte se produjo a consecuencia de una enfermedad cutánea que contrajo en el frente ruso. Su trágicamente breve encuentro con la teoría de la gravedad de Einstein desveló una de las facetas más impactantes y misteriosas del mundo natural.

El segundo ejemplo en el que la relatividad general funciona se refiere al origen y la evolución de la totalidad del universo. Como ya hemos visto, Einstein mostró que el espacio y el tiempo responden ante la presencia de masa y energía. Esta distorsión del espacio-tiempo afecta al movimiento de otros cuerpos cósmicos que se desplazan en la proximidad de los alabeos resultantes. A su vez, el modo exacto en que se mueven estos cuerpos, en virtud de su propia masa y energía, tiene un efecto añadido sobre el alabeo del espacio-tiempo, que a su vez afecta al movimiento de los cuerpos, y así sucesivamente continúa la danza cósmica interconectada. Mediante las fórmulas de la relatividad general, basadas en aspectos geométricos del espacio curvo que constituían la vanguardia de los conocimientos introducidos por Georg Bernhard Riemann (después hablaremos más sobre Riemann), Einstein pudo describir la evolución relativa del espacio, el tiempo y la materia cuantitativamente. Para su sorpresa, cuando las ecuaciones se aplicaban al universo en su conjunto, más allá de un contexto aislado dentro del universo, como un planeta o un cometa describiendo órbitas alrededor de una estrella, se llegaba a una interesante conclusión: *el tamaño total del universo espacial debe estar cambiando con el tiempo*. Es decir, la estructura del universo se está ampliando o se está reduciendo, pero no permanece invariable. Las fórmulas de la relatividad general lo muestran explícitamente.

Esta conclusión era *too much* (demasiado), incluso para Einstein. Había dado la vuelta a la intuición general relativa a la naturaleza del espacio y del tiempo que se había ido construyendo durante miles de años mediante experiencias cotidianas, pero la noción de un universo que siempre había existido y nunca cambiaba estaba demasiado fuertemente arraigada como para que incluso este pensador radical pudiera abandonarla. Por esta razón, Einstein revisó sus fórmulas y las modificó introduciendo algo denominado constante cosmológica, un término adicional que le permitía evitar esta predicción y, una vez más, gozar de la comodidad de un universo estático. Sin embargo, doce años más tarde, mediante mediciones detalladas de galaxias lejanas, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble estableció experimentalmente que el universo se expande. Según una historia que se ha hecho famosa en los anales de la ciencia, Einstein volvió después a la forma original de sus

fórmulas, definiendo su modificación temporal como el mayor error de su vida.[22] A pesar de su resistencia inicial a aceptar esta conclusión, la teoría de Einstein predecía la expansión del universo. De hecho, al principio de la década de 1920 —varios años antes de las mediciones de Hubble— el meteorólogo ruso Alexander Friedmann había utilizado las fórmulas originales de Einstein para mostrar, con cierto detalle, que todas las galaxias se desplazarían en el sustrato de una estructura espacial que se estira, alejándose así rápidamente unas de otras. Las observaciones de Hubble y otras muchas que se realizaron posteriormente, han verificado minuciosamente esta asombrosa conclusión de la relatividad general. Al ofrecer la explicación de la expansión del universo, Einstein realizó una de las mayores hazañas intelectuales de todos los tiempos.

Si la estructura del espacio se está expandiendo, aumentando así la distancia entre las galaxias que se desplazan en el flujo cósmico, podemos imaginar que la evolución retrocede en el tiempo, para aprender sobre el origen del universo. A la inversa, la estructura del espacio se contrae, haciendo que todas las galaxias se aproximen cada vez más unas a otras. Como les sucede a los alimentos en una olla a presión, cuando el universo comprime las galaxias acercándolas, la temperatura aumenta rápidamente, las estrellas se desintegran y se forma un plasma caliente de constituyentes elementales de la materia. A medida que la estructura sigue contrayéndose, la temperatura asciende sin cesar, lo mismo que la densidad del plasma primordial. Cuando imaginamos que el reloj retrocede unos 15.000 millones de años a partir de la edad del universo que observamos actualmente, este universo se comprime hasta alcanzar un tamaño aún menor. La materia que constituye *todas las cosas* —cada automóvil, cada casa, cada edificio o montaña sobre la Tierra; la propia Tierra; la Luna; Saturno, Júpiter y todos los planetas; el Sol y todas las demás estrellas de la Vía Láctea; la galaxia de Andrómeda con sus 100.000 millones de estrellas, y todas y cada una de las más de 100.000 de galaxias— queda comprimida por un tornillo cósmico hasta tener una densidad asombrosa. Y si el reloj retrocede a épocas aún más tempranas, la totalidad del cosmos se comprime hasta adquirir el tamaño de una naranja, un limón, un guisante, un grano de arena, y a tamaños aún más diminutos. Extrapolando todo el camino de vuelta al «comienzo» de su existencia, parecería como si el universo hubiese empezado siendo un *punto* —una imagen que reexaminaremos críticamente en posteriores capítulos— en el que toda la materia y la energía estaría comprimida alcanzando una densidad y una temperatura inimaginables. Se cree que una bola de fuego cósmica, el *big bang*, surgió en una erupción a partir de esta mezcla volátil, arrojando las semillas a partir de las cuales evolucionó el universo hasta llegar a ser lo que hoy conocemos.

La imagen del *big bang* como una explosión cósmica que lanza al exterior los contenidos materiales del universo; como la metralla que expulsa una bomba al

explotar, resulta útil para que nuestra mente se haga una idea de lo que pudo ser, pero es algo equívoca. Cuando una bomba explota, lo hace en un lugar concreto del espacio y en un momento concreto del tiempo. Lanza su contenido al espacio que la rodea. Pero en el *big bang* no hay espacio alrededor. Cuando devolvemos el universo hacia su comienzo, la compresión de todo el contenido material se produce porque todo el espacio se está contrayendo. La vuelta al tamaño de una naranja, al tamaño de un guisante, al tamaño del grano de arena, representan el total del universo, no algo que está dentro del universo. Cuando volvemos a los inicios, resulta sencillamente que no hay espacio fuera de la granada de mano que tiene el tamaño de una cabeza de alfiler. Por el contrario, el *big bang* es la erupción de espacio comprimido cuyo despliegue, como un maremoto, transporta materia y energía incesantemente, incluso en nuestros días.

¿Es correcta la relatividad general?

En los experimentos realizados con nuestro nivel actual de tecnología no se han hallado desviaciones con respecto a las predicciones de la relatividad general. Sólo el tiempo dirá si con una mayor precisión experimental se podrá descubrir por fin algo que indique que también esta teoría es sólo una descripción aproximada de cómo funciona la naturaleza realmente. La comprobación sistemática de teorías con unos niveles de exactitud cada vez mayores es, ciertamente, una de las maneras de progresar de la ciencia, pero no es la única. De hecho, ya hemos visto uno de estos casos: la búsqueda de una nueva teoría de la gravedad se inició, no por una refutación experimental de la teoría de Newton sino más bien por el conflicto de la teoría de la gravedad de Newton con otra teoría: la relatividad especial. Tuvo que producirse el descubrimiento de la relatividad general como una competidora de la teoría de la gravedad para que se identificaran unas fisuras en la teoría de Newton por el procedimiento de constatar unas diferencias muy pequeñas, pero medibles, entre los resultados de ambas teorías. De este modo, resulta que unas incoherencias teóricas internas pueden desempeñar un papel tan decisivo para conseguir avances, como pueden desempeñarlo otras veces los datos experimentales.

Durante el último medio siglo, la física se ha visto enfrentada con otro conflicto teórico más cuya importancia está a la par con la del que existe entre la relatividad especial y la teoría de la gravedad de Newton. La relatividad general resulta ser fundamentalmente incompatible con otra teoría que está también extraordinariamente bien comprobada: *la mecánica cuántica*. Por lo que respecta a las cuestiones tratadas

en este capítulo, el conflicto impide a los físicos comprender qué es lo que realmente les sucede al espacio, al tiempo y a la materia cuando estaban todos ellos brutalmente comprimidos en el momento del *big bang* o en el punto central de un agujero negro. Sin embargo, de una forma más general, el conflicto nos alerta sobre una deficiencia fundamental que presenta nuestra manera de concebir la naturaleza. La resolución de este conflicto ha escapado a los intentos de lograrla que han realizado algunos de los físicos teóricos más grandes, dando a dicho conflicto una bien medida reputación de ser *el problema central* de la física teórica moderna. La comprensión de este conflicto requiere familiarizarse primero con algunas características básicas de la teoría cuántica, que es lo que vamos a tratar a continuación.

Rareza microscópica

Un poco agotados después de su expedición al sistema transolar, George y Gracie vuelven a la Tierra y se van al bar H-barra para tomar una copa, que es lo que apetece después de pasar una temporada en el espacio: George pide lo de siempre —zumo de papaya con hielo para él y una tónica con vodka para Gracie— y gira hacia atrás en su taburete, con las manos enlazadas detrás de la cabeza, para disfrutar de un cigarro puro que acaba de encender. Sin embargo, justo cuando se dispone a inhalar el humo, se lleva la sorpresa de ver que el cigarro ha desaparecido de entre sus dientes. Pensando que de algún modo se ha debido de caer de la boca, George se inclina hacia delante esperando encontrar un agujero ardiendo en su camiseta o en sus pantalones. Pero no está ahí. El cigarro no aparece. Gracie, alertada por el movimiento brusco de George, mira por encima y descubre que el cigarro está sobre el mostrador, justo *detrás* del taburete en que se sienta George. «Qué raro», dice George, «¿cómo demonios puede haber ido a parar ahí? Es como si hubiera atravesado mi cabeza, pero no tengo la lengua quemada y no parece que tenga más agujeros de los habituales». Gracie examina a George y confirma extrañada que la lengua y la cabeza de George parecen perfectamente normales. En cuanto llegan las bebidas, George y Gracie se encogen de hombros y añaden el caso del cigarro caído a la lista de pequeños misterios de la vida. Pero siguen pasando cosas raras en el bar H-barra.

George mira su zumo de papaya y se da cuenta de que los cubitos de hielo no paran de traquetear —rebotando uno contra otro y contra las paredes del vaso como automóviles sobrecargados en una pista de autos de choque—. Y esta vez el extraño caso no le sucede sólo a él. Gracie levanta su vaso, cuyo tamaño es más o menos la mitad del de George; y ambos ven que allí también los cubitos de hielo rebotan por todas partes y aún más frenéticamente. Después, apenas pueden distinguir los cubitos unos de otros, pues todos ellos se funden juntos en una masa de hielo. Sin embargo, nada de esto es comparable a lo que sucede a continuación. Mientras George y Gracie están mirando con los ojos como platos el baile que se organiza en la bebida de ésta, ven cómo un cubito de hielo *atraviesa* la pared del vaso y cae sobre la barra. Tocan el vaso y comprueban que está intacto; de algún modo, el cubito de hielo ha atravesado

la pared sólida del vaso sin producirle ningún daño. «Esto tienen que ser las alucinaciones típicas que se producen después de un paseo por el espacio», dice George. Ambos desisten de volverse locos ladeando sus vasos para que los cubitos choquen con las paredes de los mismos, y se encaminan hacia sus respectivas casas para descansar. En absoluto se dan cuenta George y Gracie de que, con las prisas por marcharse, han tomado por auténtica una puerta que está pintada como motivo decorativo en una de las paredes del bar H-barra. Pero el personal de este bar está muy acostumbrado a que la gente pase a través de las paredes y apenas se dan cuenta de la precipitada salida de George y Gracie.

Hace un siglo, mientras Conrad y Freud iluminaban el corazón y el alma de la oscuridad, el físico alemán Max Planck proyectó el primer rayo de luz sobre la mecánica cuántica, un marco conceptual que afirma entre otras cosas que las experiencias de George y Gracie en el bar H-barra —si se analizan a nivel microscópico— no tienen por qué deberse a que sus facultades mentales estuvieran perturbadas. Unos hechos tan poco habituales y extraños como aquellos son típicos del comportamiento real de nuestro universo a una escala extremadamente pequeña.

El marco cuántico

La mecánica cuántica es un marco conceptual que sirve para comprender las propiedades microscópicas del universo. Además, del mismo modo que la relatividad especial y la relatividad general exigen unos cambios radicales en nuestro modo de ver el mundo cuando los objetos se mueven con gran rapidez o tienen una gran masa, la mecánica cuántica revela que el universo tiene unas propiedades igual de asombrosas, si no más, cuando se examina a escalas de distancias atómicas o subatómicas. En 1965, Richard Feynman, uno de los más grandes expertos en mecánica cuántica, escribió:

> Hubo una época en que los periódicos decían que sólo doce hombres comprendían la teoría de la relatividad. No creo ni que existiera una época así. Podría haber existido una época en que tan sólo un hombre comprendiera dicha teoría, antes de publicarla, porque fuera el único que había caído en la cuenta de que las cosas podían ser así. Pero, después de que los demás leyeran su publicación, muchas personas comprendieron, de una forma o de otra, la teoría de la relatividad. Seguramente fueron más de doce. Por otra parte, creo que puedo afirmar sin riesgo de equivocarme que

nadie comprende la mecánica cuántica.[23]

Aunque Feynman expresó esta opinión hace más de tres décadas, hoy en día sigue siendo igualmente válida. Lo que él quería decir es que, aunque las teorías de la relatividad especial y la relatividad general exigen una revisión drástica de los modos anteriores de entender el mundo, cuando aceptamos plenamente los principios básicos que subyacen a estas teorías, las nuevas y extrañas implicaciones que tienen para el espacio y el tiempo se deducen directamente a partir de un minucioso razonamiento lógico. Si usted valora adecuadamente las explicaciones de la obra de Einstein recogidas en los dos capítulos anteriores, reconocerá —aunque sea sólo por un momento— la inevitabilidad de las conclusiones que hemos sacado. La mecánica cuántica es diferente. Hacia 1928, se habían desarrollado ya muchas de las fórmulas matemáticas y de las reglas de la mecánica cuántica y, desde entonces, se han utilizado para realizar *las* predicciones numéricas más precisas y eficaces de toda la historia de la ciencia. Sin embargo, aquellos que utilizan la mecánica cuántica se encuentran en realidad con que siguen unas reglas y aplican unas fórmulas establecidas por los «padres fundadores» de esta teoría —métodos de cálculo que han de aplicarse fielmente— sin comprender del todo *por qué* funcionan estos métodos o *qué* es lo que significan realmente. A diferencia de lo que sucede con la relatividad, son pocas las personas, si es que las hay, que comprenden la mecánica cuántica a un nivel «profundo».

¿Qué podemos hacer ante esto? ¿Significa que a nivel microscópico el universo funciona de una manera tan oscura y extraña que la mente humana; que ha evolucionado desde tiempos inmemoriales para poder asumir fenómenos cotidianos y perceptibles, es incapaz de comprender plenamente «lo que en realidad está pasando»? O, si no, ¿podría ser que, por un accidente histórico, los físicos hubieran construido una formulación de la mecánica cuántica extremadamente difícil que, aun siendo eficaz cuantitativamente, oscurece la verdadera naturaleza de la realidad? Nadie lo sabe. Puede que en el futuro alguna persona inteligente tenga la clarividencia de encontrar una nueva formulación que aclare completamente el «por qué» y el «qué» de los distintos aspectos de la mecánica cuántica. Y también puede que no. Lo único que sabemos con certeza es que la mecánica cuántica nos muestra de una manera absoluta e inequívoca que ciertos conceptos básicos esenciales para nuestro conocimiento del entorno cotidiano *no tienen sentido* cuando nuestro centro de interés se reduce al ámbito de lo microscópico. En consecuencia, debemos modificar significativamente tanto nuestro lenguaje como nuestro modo de razonar cuando intentemos comprender y explicar el universo a escalas atómicas y subatómicas.

En las secciones siguientes desarrollaremos los aspectos básicos de este lenguaje

y detallaremos algunas de las sorpresas importantes que trae consigo. Si durante este proceso le parece a usted que la mecánica cuántica es en conjunto extraña o incluso absurda, tenga en cuenta siempre dos cosas. En primer lugar, más allá del hecho de que es una teoría matemáticamente coherente, la única razón por la que creemos en la mecánica cuántica es que proporciona predicciones que se han verificado y resultan de una exactitud asombrosa. Si alguien le da a usted una enorme cantidad de detalles íntimos de su infancia pormenorizando de una manera impresionante, es difícil no creerle cuando afirma ser aquel hermano suyo desaparecido hace mucho tiempo. En segundo lugar, no será usted el único que reacciona de esa manera ante la mecánica cuántica. Es un punto de vista que han mantenido en mayor o menor medida algunos de los físicos más reverenciados de todos los tiempos. Einstein se negó a aceptar plenamente la mecánica cuántica, e incluso Niels Bohr, uno de los pioneros más importantes de la teoría cuántica y uno de sus defensores más vehementes, afirmó en una ocasión que quien no siente vértigo cuando piensa en la mecánica cuántica, es alguien que realmente no la ha comprendido.

Hace demasiado calor en la cocina

El camino hacia la mecánica cuántica comenzó con un problema verdaderamente misterioso. Supongamos que el horno que tiene usted en casa está perfectamente aislado y que lo gradúa a una temperatura determinada, digamos que a unos 200 grados centígrados, y espera el tiempo suficiente para que se caliente. Incluso si ha aspirado todo el aire del horno antes de encenderlo, al calentar sus paredes se generan ondas de radiación en su interior. Se trata del mismo tipo de radiación —calor y luz en forma de ondas electromagnéticas— que emite la superficie del Sol, o un atizador de hierro que esté al rojo vivo.

Aquí es donde se plantea el problema. Las ondas electromagnéticas transportan energía —por ejemplo, la vida en nuestro planeta depende totalmente de la energía transmitida desde el Sol a la Tierra mediante ondas electromagnéticas—. Al comienzo del siglo XX, unos físicos calcularon la energía total transportada por la radiación electromagnética en el interior de un horno a una temperatura determinada. Utilizando procedimientos de cálculo bien definidos, consiguieron una respuesta ridícula: para cualquier temperatura seleccionada, la energía total en el interior del horno es *infinita*.

Cualquiera podía ver que esto no tenía sentido; un horno caliente puede contener una cantidad importante de energía, pero, desde luego, no una cantidad infinita. Para

comprender la solución propuesta por Planck, merece la pena examinar el problema con un poco más de detalle. Resulta que, cuando la teoría electromagnética de Maxwell se aplica a la radiación del interior de un horno, dicha teoría muestra que las ondas generadas por las paredes calientes deben tener un numero *entero* de picos y senos que encaje perfectamente entre superficies opuestas. En la Figura 4.1 se muestran algunos ejemplos.

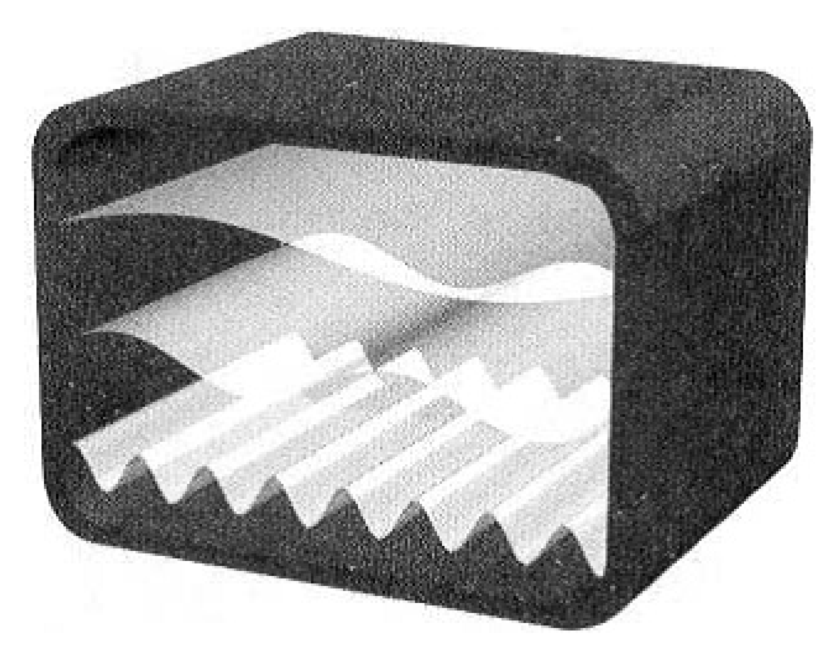


Figura 4.1 La teoría de Maxwell nos dice que las ondas de radiación que se producen en un horno tienen un número entero de picos y senos; estas ondas realizan ciclos ondulatorios completos.

Los físicos utilizan tres términos para describir estas ondas: longitud de onda, frecuencia y amplitud. La *longitud de onda* es la distancia entre dos picos sucesivos o entre dos senos sucesivos, como se puede ver en la Figura 4.2.

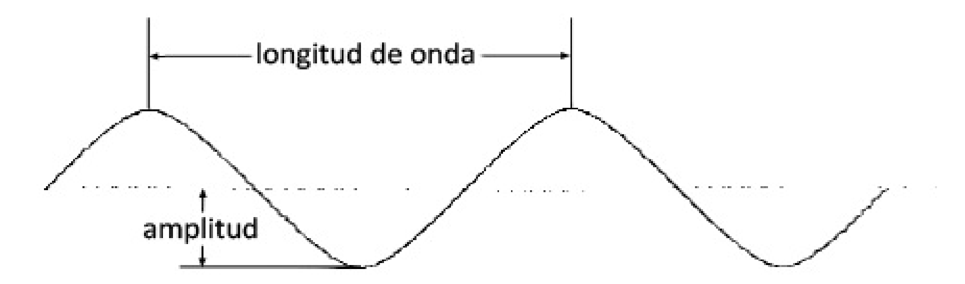


Figura 4.2 La longitud de onda es la distancia entre dos picos o dos senos consecutivos de una onda. La amplitud es la altura o la profundidad máxima de la onda.

La existencia de más picos y senos significa una longitud de onda más corta, ya que todos ellos han de estar encajados entre las paredes fijas del horno. La *frecuencia* se refiere al número de ciclos de oscilación completos hacia arriba y hacia abajo que una onda realiza cada segundo. Sucede que la frecuencia está determinada por la longitud de onda y viceversa: longitudes de onda más largas implican frecuencias

más bajas; longitudes de onda más cortas implican frecuencias más altas. Para ver el porqué de esto, pensemos en lo que sucede cuando se generan ondas agitando una cuerda larga que está atada por un extremo. Para generar una longitud de onda que sea larga, agitamos un extremo pausadamente hacia arriba y hacia abajo. La frecuencia de las ondas se corresponde con el número de ciclos por segundo que realiza el brazo y es por lo tanto bastante bajo. Sin embargo, para generar longitudes de onda cortas hay que agitar el brazo más frenéticamente —más frecuentemente, por decirlo así— y esto produce ondas de frecuencia más alta. Finalmente, los físicos utilizan el término *amplitud* para indicar la máxima altura o profundidad de una onda, como también se ilustra en la Figura 4.2.

En el caso de que a usted le parezca que las ondas electromagnéticas son un poco abstractas, otro buen ejemplo para tener en cuenta son las ondas que se producen al pulsar una cuerda de violín. Las diferentes frecuencias de las mismas se corresponden con diferentes notas musicales: cuanto más alta es la frecuencia, más alta es también la nota. La amplitud de una onda para una cuerda de violín es determinada por la fuerza con que se pulse dicha cuerda. Una pulsación más fuerte significa que se pone más energía en la perturbación que transmite la onda; por lo tanto, más energía supone una mayor amplitud. Esto se puede oír, ya que el tono resultante suena con mayor volumen. De manera similar, menos energía supone una amplitud menor y un volumen de sonido más bajo.

Utilizando la termodinámica del siglo XIX, los físicos pudieron determinar cuánta energía suministrarían las paredes calientes del horno a las ondas electromagnéticas de cada una de las longitudes de onda posibles, es decir, con cuanta fuerza «pulsaría» cada onda las paredes del horno. El resultado que obtuvieron es sencillo de enunciar: cada una de las ondas posibles —*a despecho de su longitud de onda*— lleva la misma cantidad de energía (con la cantidad exacta que determina la temperatura del horno). En otras palabras, todas las pautas posibles de ondas que produce el horno están en un pie de igualdad absoluta por lo que respecta a la cantidad de energía que contienen.

Al principio, éste parece un resultado interesante, aunque intranscendente. Pero no lo es. Representa el ocaso de lo que se ha dado en llamar física clásica. La razón es la siguiente: aunque se ha de cumplir el requisito de que todas las ondas tengan un número entero de picos y senos, dentro de la enorme variedad de pautas concebibles para las ondas que se producen en el horno, hay todavía un número infinito de otras que también son posibles: las que tienen aún más picos y senos. Dado que todas las pautas de ondas llevan la misma cantidad de energía, hablar de un número infinito de pautas se traduce en una cantidad infinita de energía. A llegar el cambio de siglo, había una mosca gigantesca en la sopa teórica.

Haciendo paquetes con el cambio de siglo

En 1900, Planck tuvo una genial intuición que permitió encontrar un modo de resolver este rompecabezas y le valdría en 1918 el premio Nobel de física.[24] Para hacernos una idea de cuál fue su solución, supongamos que usted y una enorme multitud de gente —«infinita» en número— están apiñados en un almacén grande y frío dirigido por un propietario mezquino. En la pared hay un bonito termostato digital que controla la temperatura, pero usted se lleva una sorpresa cuando descubre el dinero que cobra el propietario por la calefacción. Si el termostato está puesto a 50 grados Fahrenheit, cada uno debe pagar al propietario 50 dólares. Si está puesto a 55 grados Fahrenheit, cada uno debe pagar 55 dólares, y así siempre. Usted se da cuenta de que, puesto que comparte el almacén con un número infinito de compañeros, el propietario ganará una cantidad infinita de dinero, siempre y cuando se ponga la calefacción.

Pero, leyendo más detenidamente las normas de pago del propietario, usted ve que hay una vía de escape. Dado que el propietario es un hombre muy ocupado, no desea tener que dar el cambio, sobre todo cuando se trata de un número infinito de inquilinos. Por eso, utiliza un sistema basado en la honradez. Aquellos que pueden pagar exactamente lo que deben, lo hacen así. Los que no pueden pagar el importe exacto pagan sólo la cantidad que puedan entregar sin que sea preciso devolverles el cambio. Entonces, con la intención de que todo el mundo se implique, pero deseando evitar un pago exorbitante por la calefacción, les propone organizar el dinero del grupo de la siguiente manera: una persona lleva todo su dinero en monedas de 1 centavo, otra persona lo lleva todo en monedas de 5 centavos, otra en monedas de diez centavos, otra en monedas de cuarto de centavo y así todos pasando por el que lleva todo en billetes de un dólar, el que lo lleva en billetes de 5 dólares, el que tiene billetes de 10 dólares, el que lleva de 20, el que lleva de 50, el que lleva de 100, el que lleva de 1000, y así con unidades aún mayores (y no habituales). Usted pone el termostato descaradamente a 80 grados Fahrenheit y se queda esperando la llegada del propietario. Cuando llega, la persona que lleva monedas de 1 centavo paga en primer lugar entregando 8.000 monedas. La persona que lleva monedas de 5 centavos entrega 1600 monedas, la persona que lleva monedas de 10 centavos paga con 800 monedas, la que sólo tiene cuartos de dólar entrega 320 monedas, la que lleva billetes de 1 dólar entrega 80 billetes, la que lleva billetes de 5 dólares paga con 16 billetes, la persona que sólo tiene billetes de 10 dólares entrega ocho, la que lleva billetes de 20 dólares paga con cuatro, la persona que sólo tiene billetes de 50 dólares paga con un billete (ya que dos billetes excederían el precio y habría que darle cambio). Pero cualquiera que tenga un solo tipo de monedas o billetes, es decir, una sola unidad —un «paquete» mínimo de dinero— está por encima del pago requerido. Por lo tanto,

las personas que están en este caso no pueden pagar al propietario, y éste, por consiguiente, en vez de recibir la cantidad infinita de dinero que esperaba, se tiene que marchar con la miserable suma de 690 dólares.

Planck utilizó una estrategia muy similar para reducir el absurdo resultado de una cantidad infinita de energía dentro del horno a una cantidad que es finita. He aquí cómo lo hizo. Planck tuvo la audacia de intuir que la energía que lleva una onda electromagnética dentro del horno, al igual que el dinero, se presenta en paquetes. La cantidad de energía puede ser una vez, dos veces, tres veces o más veces la «unidad fundamental de energía», pero siempre un número entero de veces esta unidad. Del mismo modo que no podemos tener un tercio de centavo, ni dos cuartos y medio de dólar, Planck afirmó que cuando se trata de energía no están permitidas las fracciones. Ahora bien, nuestras unidades monetarias son así porque las determina el Tesoro de Estados Unidos. Buscando una explicación más a fondo, Planck sugirió que la unidad de energía de una onda —el paquete mínimo de energía que puede existir— viene determinada por su frecuencia. Concretamente, planteó la idea de que la energía mínima que puede tener una onda es *proporcional a su frecuencia*: una frecuencia mayor (una longitud de onda más corta) implica una energía mínima también mayor; una frecuencia menor (una longitud de onda más larga) una energía mínima asimismo menor. Por poner un ejemplo aproximado, del mismo modo que las olas suaves del océano son largas y fastuosas, mientras que las violentas son cortas y picadas, así también la radiación de larga longitud de onda es intrínsecamente menos energética que la radiación cuya longitud de onda es corta.

He aquí la gracia del asunto: los cálculos de Planck demostraron que esta presentación en paquetes que tiene la energía posible en cada onda evitaba el ridículo planteamiento anterior relativo a una energía total infinita. No es difícil ver por qué. Cuando un horno se calienta a una temperatura determinada, los cálculos basados en la termodinámica del siglo XIX predecían la energía que, supuestamente, cada onda aportaría al total. Pero, al igual que aquellos inquilinos que no podían pagar la cantidad de dinero que cada uno debía al propietario porque la unidad monetaria de que disponían era demasiado grande, si la energía mínima que una onda puede llevar supera la cantidad de energía con la que se supone que ha de contribuir, no podrá aportar nada y se quedará inactiva. Dado que, según Planck, la energía mínima que una onda puede llevar es proporcional a su frecuencia, cuando estamos examinando las ondas de frecuencia cada vez mayor (con longitud de onda más corta) que se generan en el horno, antes o después la energía mínima que pueden llevar es mayor que la contribución de energía esperada. Como los inquilinos del almacén que sólo tenían unidades monetarias mayores que los billetes de 20 dólares, las ondas que tienen frecuencias cada vez mayores no pueden contribuir con la cantidad de energía exigida por la física del siglo XIX. Así, del mismo modo que sólo un número finito

de inquilinos puede contribuir al pago total por la calefacción —resultando así una cantidad finita de dinero total— también sucede que sólo un número finito de ondas puede contribuir a sumar la energía total del horno —resultando así también una cantidad finita de energía total—. Ya sea energía o dinero, el empaquetamiento en unidades fundamentales —y el tamaño cada vez mayor de los paquetes a medida que vamos hacia frecuencias más altas o hacia unidades monetarias mayores— cambia un resultado infinito por otro que es finito.[25]

Eliminando la contradicción manifiesta que supone un resultado infinito, Planck había dado un paso importante. Pero lo que realmente hizo que la gente creyera en la validez de sus intuiciones fue que la solución finita que su nuevo planteamiento daba para la energía del interior del horno coincidía espectacularmente con las mediciones experimentales. Concretamente, lo que Planck descubrió fue que, restando *un* parámetro que aparecía en sus nuevos cálculos podía predecir exactamente la energía medida en un horno a cualquier temperatura previamente seleccionada. Ese parámetro era el factor de proporcionalidad entre la frecuencia de una onda y el paquete mínimo de energía que podía tener. Planck descubrió que este factor de proporcionalidad —conocido actualmente como *constante de Planck* que se representa como $\hbar$ (se lee «h-barra»)— tiene un valor de mil cuatrillonésimas en las unidades habituales.[26] El minúsculo valor de la constante de Planck significa que el tamaño de los paquetes de energía suele ser muy pequeño. Esta es la razón por la que, por ejemplo, nos *parece* que podemos conseguir que cambie de manera continua la energía de cualquier onda producida por una cuerda de violín —y, por lo tanto, el volumen de sonido que produce—. Sin embargo, en la realidad la energía de la onda varía de forma concreta, con pequeños saltos, «al modo de Planck», pero el tamaño de estos saltos es tan pequeño que las variaciones concretas de un nivel de volumen a otro parecen continuas. Según la teoría de Planck, el tamaño de estos saltos de la energía crece a medida que la frecuencia de las ondas se vuelve cada vez más alta (mientras las longitudes de onda se hacen cada vez más cortas). Éste es el ingrediente crucial que resuelve la paradoja de la energía infinita.

Como veremos más adelante, la hipótesis cuántica de Planck sirve para mucho más que permitimos entender cuánta es la energía contenida en un horno. Cambia radicalmente muchas de las cosas relativas al mundo que consideramos evidentes por sí mismas. El pequeño valor de $\hbar$ hace que la mayoría de las cosas que se desvían radicalmente de lo que es habitual en la vida cotidiana vayan a parar al dominio de la microscopía, pero si $\hbar$ fuera mucho más grande de lo que verdaderamente es, los extraños sucesos del bar H-barra serían en realidad algo corriente. Como veremos, sus contrapartidas microscópicas ciertamente lo son.

¿Qué son realmente esos «paquetes»?

Plank no tenía ninguna explicación que justificara aquella importante aportación consistente en presentar la energía en paquetes. Más allá del hecho de que la idea funcionaba, ni él ni ningún otro podían dar una razón por la que esto tuviera que ser necesariamente cierto. Como dijo el físico George Gamow en una ocasión, es como si la naturaleza nos permitiera beber o bien una pinta completa de cerveza o nada de cerveza en absoluto, no habiendo ningún término medio entre ambas posibilidades.[27] En 1905, Einstein halló una explicación y por ella le fue concedido el premio Nobel de física en 1921.

Einstein halló esta explicación dándole vueltas a algo llamado el efecto fotoeléctrico. El físico alemán Heinrich Hertz en 1887 fue el primero en descubrir que, cuando la radiación electromagnética —la luz— ilumina ciertos metales; éstos emiten electrones. Esto no es en sí mismo especialmente sorprendente. Los metales tienen la propiedad de que algunos de sus electrones sólo están ligeramente vinculados al interior de los átomos (que es la razón por la cual los metales son tan buenos conductores de la electricidad). Cuando la luz choca con una superficie metálica cede a ésta su energía, como lo hace cuando choca con nuestra piel, haciendo que la sintamos más caliente. Esta energía transferida puede producir una agitación en los electrones del metal y algunos de éstos, al no estar más que débilmente ligados a los átomos, pueden ser impulsados a salir de la superficie.

Sin embargo, las extrañas características del efecto fotoeléctrico se ponen de manifiesto cuando se estudian con más detalle algunas de las propiedades de los electrones emitidos. A primera vista se podría pensar que, cuando la intensidad de la luz —su brillo— aumenta, la velocidad de los electrones emitidos también aumentará, ya que la onda electromagnética de choque adquiere más energía. Pero esto *no* sucede. En cambio, el *número* de electrones emitidos aumenta, pero su velocidad permanece igual. Por otro lado, se ha observado experimentalmente que la velocidad de los electrones emitidos *sí* que aumenta cuando aumenta la *frecuencia* de la luz que choca contra la superficie, y, lo que es equivalente, la velocidad de los electrones disminuye si disminuye la frecuencia de la luz. (Para las ondas electromagnéticas correspondientes a la parte visible del espectro, un aumento de la frecuencia supone un cambio en el color desde el rojo al naranja, al amarillo, al verde, al azul, al índigo y, finalmente, al violeta. Las frecuencias más altas que la del violeta no son visibles y corresponden a los rayos ultravioleta y, posteriormente, a los rayos X; las frecuencias que son más bajas que la del rojo tampoco son visibles, y corresponden a los rayos infrarrojos). De hecho, cuando la frecuencia de la luz utilizada disminuye, se llega a un punto en que la velocidad de los electrones emitidos desciende hasta el cero y la superficie deja de emitirlos, *independientemente*

de la posible intensidad cegadora de la fuente de luz. Por alguna razón desconocida, el color del haz de luz que choca —no su energía total— determina si se van a emitir electrones o no, y si se emiten, la energía que tienen.

Para entender cómo explicó Einstein estos hechos tan desconcertantes, volvamos al ejemplo del almacén, que se ha calentado hasta alcanzar una sofocante temperatura de 40 grados centígrados. Supongamos que el propietario, que odia a los niños, exige que todos los menores de quince años vivan en el profundo sótano del almacén, donde pueden ser vistos por los adultos desde un enorme balcón que rodea el edificio. Además, el único modo de que los niños que están encerrados en el sótano puedan salir del almacén es que paguen al guarda 85 centavos en concepto de gastos de salida. (Este propietario es *como* un ogro). Los adultos, que, siguiendo el consejo que usted les dio, han organizado sus fondos colectivos según la unidad monetaria, tal como hemos explicado anteriormente, sólo pueden dar dinero a los niños echándoselo desde el balcón. Veamos qué es lo que sucede.

La persona que lleva monedas de 1 centavo comienza echándoles unos pocos, pero esto es una cantidad demasiado escasa para que alguno de los niños pueda pagar los gastos de salida. Además, debido a que hay un mar «infinito» de niños luchando todos ferozmente en un tumulto turbulento por conseguir el dinero que cae, aunque el adulto que tiene las monedas de 1 centavo les echara unas cantidades enormes, ningún niño llegaría, ni de lejos, a reunir los 85 centavos que necesita para pagar al guarda. Lo mismo sucedería en el caso de los adultos que llevan monedas de 5 centavos, de 10 o de cuarto de dólar. Aunque cada uno les echara una cantidad extraordinariamente elevada, sería una suerte enorme que algún niño pudiera conseguir tan sólo una moneda (la mayoría de ellos no conseguirían absolutamente ninguna) y, desde luego, ninguno logrará reunir los 85 centavos que necesita para marcharse de allí. Sin embargo, cuando el adulto que lleva billetes de 1 dólar empezara a echárselos —aunque dólar a dólar sólo se reunirían sumas comparativamente pequeñas— los niños que consiguieran al menos un billete podrían irse inmediatamente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, incluso si este adulto se animara a echarles barriles de billetes de 1 dólar, aunque el número de niños que podrían irse aumentaría enormemente, cada uno tendría 15 centavos de sobra después de pagar al guarda. Esto es cierto independientemente del número total de billetes que se les eche.

Ahora vamos a ver que tiene todo esto que ver con el efecto fotoeléctrico. Basándose en los datos experimentales que hemos mencionado anteriormente, Einstein propuso que la descripción de la energía de la onda, que según Planck está distribuida en paquetes, se añadiera a una nueva descripción de la luz. Un rayo de luz, según Einstein, se debería considerar en realidad como un *flujo de diminutos paquetes* —diminutas partículas de luz— que finalmente recibieron el nombre de

fotones, dado por el químico Gilbert Lewis (una idea que podemos utilizar en nuestro ejemplo del reloj de luz del capítulo 2). Para hacernos una idea de la escala, según esta visión de la luz como partículas, una bombilla corriente de cien vatios emite alrededor de cien trillones (10^{20}) de fotones por segundo. Einstein utilizó este nuevo planteamiento para sugerir que existiría un mecanismo microscópico subyacente al efecto fotoeléctrico: un electrón salta fuera de una superficie metálica, si lo golpea un fotón provisto de energía suficiente. Pero ¿qué es lo que determina la energía de un fotón individual? Para explicar los datos experimentales, Einstein siguió las directrices de Planck y propuso que la energía de *cada* fotón fuera proporcional a la frecuencia de la onda luminosa (tomando como factor de proporcionalidad a la constante de Planck).

Ahora bien, como sucedía con la cantidad mínima exigida a los niños por salir del almacén, los electrones que están en un metal, para poder saltar fuera de la superficie de dicho metal, han de ser empujados por un fotón que posea una cierta energía mínima. (Lo mismo que en el caso de los niños que se peleaban entre sí por coger el dinero, es extremadamente improbable que un electrón reciba golpes de más de un fotón —la mayoría no recibe ninguno). Pero, si la frecuencia del rayo de luz que choca contra la superficie es demasiado baja, a sus fotones les faltará la fuerza necesaria para desplazar a los electrones. Del mismo modo que ningún niño puede permitirse salir independientemente del enorme número de monedas que los adultos dejan caer sobre ellos, ningún electrón se libera independientemente de la enorme cantidad de energía total contenida en el rayo de luz que choca contra la superficie, si su frecuencia (y en consecuencia la energía da cada uno de sus fotones) es demasiado baja.

Sin embargo, al igual que los niños pueden salir del almacén en cuanto es suficientemente grande la unidad monetaria que cae sobre ellos, los electrones saltan fuera de la superficie en cuanto la frecuencia de la luz con que se les ilumina —la unidad de energía— es lo suficientemente alta. Además, de la misma manera que el adulto que tiene billetes de un dólar aumenta la cantidad total de dinero que cae aumentando el número de billetes que echa, la intensidad total de un rayo de luz de una frecuencia determinada se aumenta cuando se hace mayor el número de fotones que contiene. Y, lo mismo que una mayor cantidad de dólares hace que sean más los niños que pueden salir, también una cantidad mayor de fotones hace que sean más los electrones que reciben un golpe y saltan fuera de la superficie. Pero hay que tener en cuenta que la energía sobrante que tiene cada uno de esos electrones cuando ya se ha liberado de la superficie depende únicamente de la energía del fotón que lo ha golpeado —y ésta viene determinada por la frecuencia del rayo de luz, no por su intensidad total—. Del mismo modo que los niños salen del sótano con 15 centavos que les han sobrado, independientemente de cuántos billetes de 1 dólar les hayan

echado, cada electrón abandona la superficie con la misma energía —y por lo tanto la misma velocidad— independientemente de la intensidad total de la luz de choque. Si la cantidad total de dinero es mayor, esto significa sencillamente que son más los niños que pueden irse; si la energía total del rayo de luz es mayor, lo que esto quiere decir es que hay más electrones que se liberan. Si queremos que los niños se vayan del sótano con más dinero, debemos hacer que sea mayor la unidad monetaria que se les echa; si queremos que los electrones salgan de la superficie a mayor velocidad, debemos aumentar la frecuencia del rayo de luz que choca contra la superficie —es decir, hemos de aumentar la unidad de energía que llevan los fotones con los que iluminamos la superficie del metal—.

Esto coincide exactamente con los datos experimentales. La frecuencia de la luz (su color) determina la velocidad de los electrones emitidos; la intensidad total de la luz determina el número de electrones emitidos. Así, Einstein demostró que la intuición de Planck con respecto a la energía en paquetes refleja realmente una característica fundamental de las ondas electromagnéticas: están formadas por partículas —los fotones— que son pequeños paquetes, o *cuantos*, de luz. El hecho de que la energía contenida en estas ondas esté distribuida en paquetes, viene dado por el de que dichas ondas, a su vez, estén formadas por paquetes.

El planteamiento de Einstein representaba un gran avance. Sin embargo, como veremos ahora, esta historia no es tan sencilla y clara como podría parecer.

¿Es una onda o una partícula?

Todo el mundo sabe que el agua —y, por lo tanto, las ondas u olas que se forman en el agua— está compuesta por un enorme número de moléculas. Entonces, ¿es realmente sorprendente que las ondas de la luz estén compuestas por un enorme número de partículas, es decir, de fotones? Lo es. Pero la sorpresa está en los detalles. Hace más de trescientos años, Newton afirmó que la luz consiste en una corriente de partículas, por lo que la idea no es del todo nueva. Sin embargo, algunos de los colegas de Newton, sobre todo el físico holandés Christian Huygens, discreparon de esta idea y dijeron que la luz es una onda. Esto suscitó un apasionado debate, hasta que finalmente unos experimentos realizados por el físico inglés Thomas Young a principios del siglo XIX demostraron que Newton estaba equivocado.

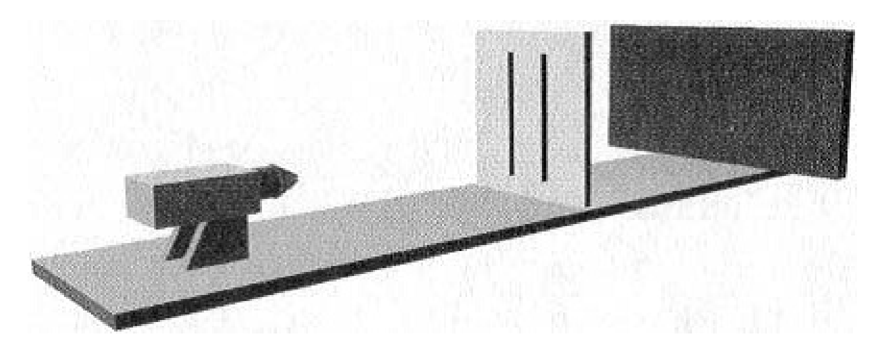


Figura 4.3 En el experimento de la doble rendija, un rayo de luz se proyecta sobre una barrera en la que se han hecho dos rendijas. La luz que atraviesa la barrera se graba entonces en una placa fotográfica, cuando una de las rendijas está abierta o ambas lo están.

En la Figura 4.3 se ilustra esquemáticamente una versión del planteamiento experimental de Young —conocido como el experimento de la doble rendija—. Feynman solía decir que toda la mecánica cuántica se puede deducir reflexionando detenidamente sobre las implicaciones de este singular experimento, por lo que vale la pena comentarlo. Como vemos en la Figura 4.3, la luz se proyecta sobre una barrera sólida delgada en la que se han cortado dos rendijas. Una placa fotográfica graba la luz que pasa a través de las rendijas —las zonas más claras de la fotografía indican que ha incidido sobre ellas una mayor cantidad de luz—. El experimento consiste en comparar las imágenes de distintas placas fotográficas resultantes de mantener abiertas una o dos de las rendijas de la barrera cuando la fuente de luz está encendida.

Si la rendija de la izquierda está tapada y la de la derecha está abierta, la fotografía queda como se representa en la Figura 4.4.

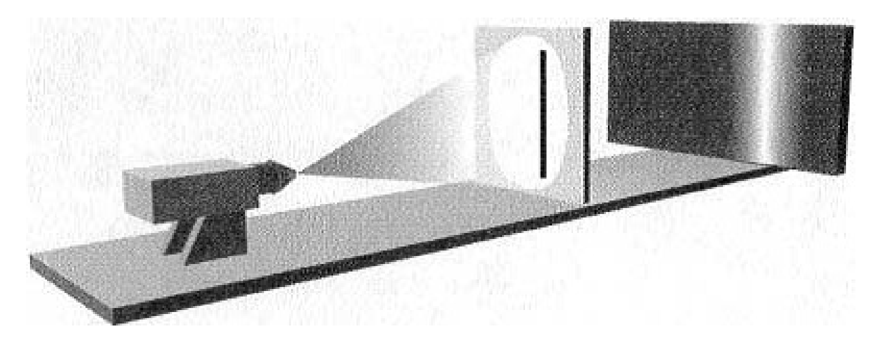


Figura 4.4 La rendija derecha está abierta en este experimento, provocando una imagen sobre la placa fotográfica como la que se muestra.

Esto es lógico, porque la luz que llega a la placa fotográfica debe pasar a través de la única rendija abierta y, por consiguiente, se concentrará en la parte derecha de la fotografía. Similarmente, si la rendija de la derecha está tapada y la de la izquierda está abierta, la fotografía será tal como aparece en la Figura 4.5.

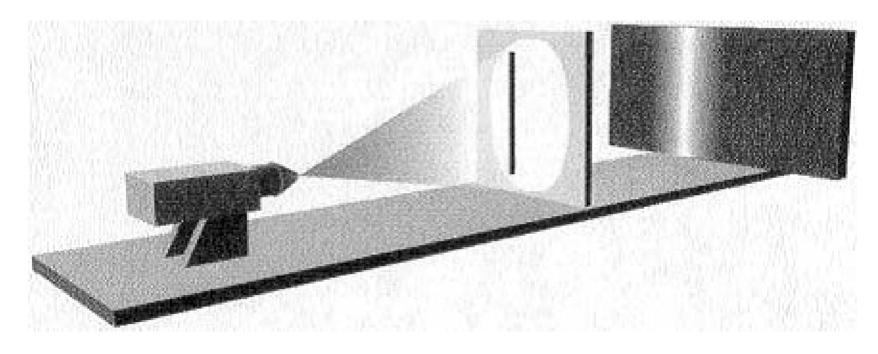


Figura 4.5 Como en la Figura 4.4, salvo que ahora es la rendija de la izquierda la que está abierta.

Si *ambas* rendijas están abiertas, la definición de la luz como partículas propuesta por Newton conduce a suponer que la placa fotográfica quedará como se ve en la Figura 4.6, es decir, una combinación de las Figuras 4.4 y 4.5.

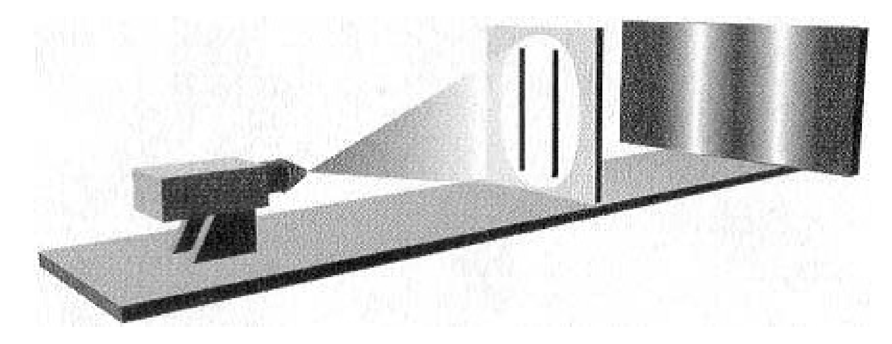


Figura 4.6 La visión de la luz de Newton predice que cuando ambas rendijas están abiertas, la placa fotográfica será una mezcla de las imágenes en las figuras 4.4 y 4.5.

En esencia, si consideramos que los corpúsculos de luz de que habla Newton son como unos perdigones muy pequeños que disparamos a la pared, los que atraviesen la barrera se concentrarán en las dos áreas que están alineadas con las dos rendijas. Por el contrario, la definición de la luz como una onda nos lleva a una predicción muy diferente para explicar lo que sucede cuando las dos rendijas están abiertas. Analicemos esto.

Supongamos por un momento que en vez de ondas de luz utilizamos ondas en el agua. El resultado que obtendremos será el mismo, pero es más fácil pensar en el agua. Cuando las ondas acuáticas golpean contra la barrera, de cada rendija emergen ondas acuáticas que salen con forma circular, muy parecidas a las que se forman cuando arrojamos un guijarro a una charca, como se ilustra en la Figura 4.7. (Es sencillo intentar este experimento utilizando una barrera de cartón con dos rendijas introducida en una sartén con agua). Cuando las ondas que emergen de cada rendija se superponen, sucede algo bastante interesante. Si dos picos de las ondas se superponen, la altura de la onda acuática en ese punto aumenta: es la suma de las alturas de los dos picos. Si dos senos de las ondas se superponen, la profundidad de la depresión del agua en ese punto aumenta de una manera similar. Finalmente, si un pico de la onda que emerge de una rendija se superpone con un seno de la onda que

emerge de la otra rendija, *se anulan mutuamente*. (De hecho, ésta es la idea en que se basan los estupendos auriculares de eliminación de ruido: miden la forma de la onda sonora que les llega y entonces producen otra cuya forma es exactamente la «opuesta», consiguiendo la anulación de ruidos no deseados). Entre estas superposiciones extremas —picos con picos, senos con senos, y picos con senos— hay una multitud de aumentos y anulaciones parciales de la altura. Si usted, junto con una multitud de personas, se alinea en pequeños botes paralelamente a la barrera y cada uno declara con qué ímpetu ha sido empujado por la onda acuática saliente cuando ésta pasa por la línea de embarcaciones, el resultado será parecido a lo que se muestra en el extremo derecho de la Figura 4.7. Los lugares en que se produce un empuje significativo son aquellos en que coinciden los picos (o los senos) de las ondas de cada rendija. Las zonas de mínimo o nulo empuje son aquellas en que los picos procedentes de una rendija coinciden con los senos procedentes de la otra; dando como resultado que picos y senos se contrarrestan.

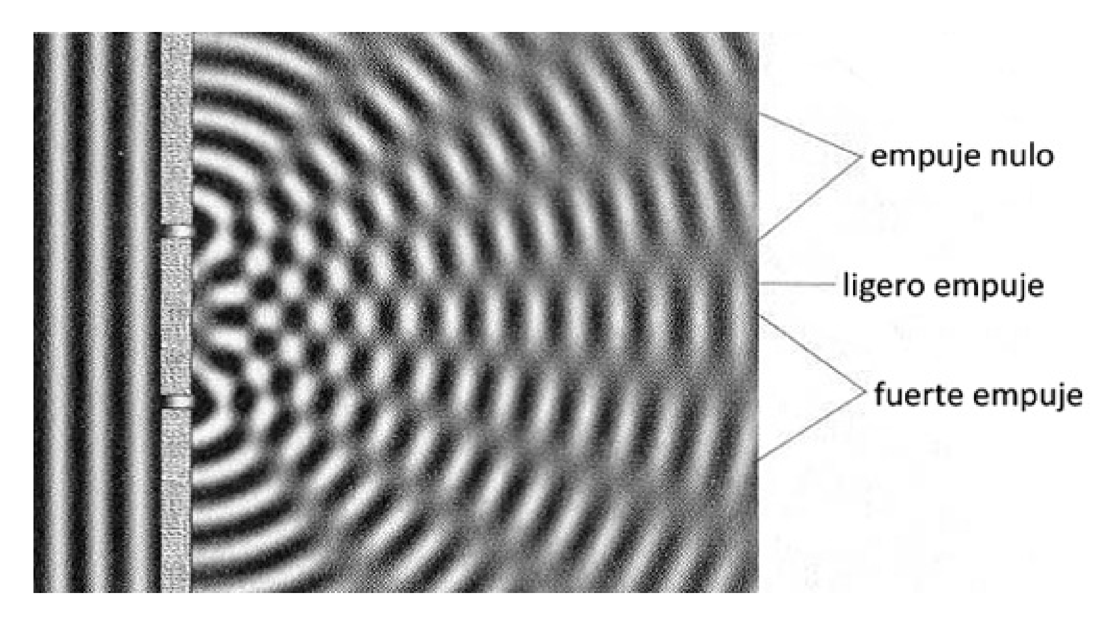


Figura 4.7 Las ondas de agua circulares que emergen de cada rendija se superponen con las de la otra, causando que la onda total se incremente en algunos lugares y decrezca en otros.

Puesto que la placa fotográfica graba en qué medida «empuja» la luz que llega, exactamente el mismo razonamiento aplicado a la imagen de las ondas de un rayo de luz sirve para explicamos que, cuando ambas rendijas están abiertas, la fotografía será como la que se ve en la Figura 4.8. Las áreas más claras de la Figura 4.8 son las zonas en que coinciden los picos (o los senos) de las ondas luminosas procedentes de las rendijas. Las áreas oscuras son las zonas en que los picos de la onda que viene de una rendija coinciden con los senos de la onda procedente de la otra, dando lugar a una anulación. La sucesión de bandas claras y oscuras se conoce como *espectro de interferencias*. Esta fotografía difiere significativamente de la que se mostraba en la Figura 4.6, y por consiguiente hay un experimento concreto para distinguir entre las

imágenes de la partícula y de la onda de luz. Young llevó a cabo una versión de este experimento y sus resultados encajaban con lo representado en la Figura 4.8, confirmando así la teoría de que se trata de una onda. La visión de Newton de la luz como corpúsculos quedó derrotada (aunque pasó bastante tiempo hasta que los físicos aceptaron esto). La idea prevalecedora, que es la de la luz como ondas, recibió posteriormente de Maxwell una fundamentación matemática firme.

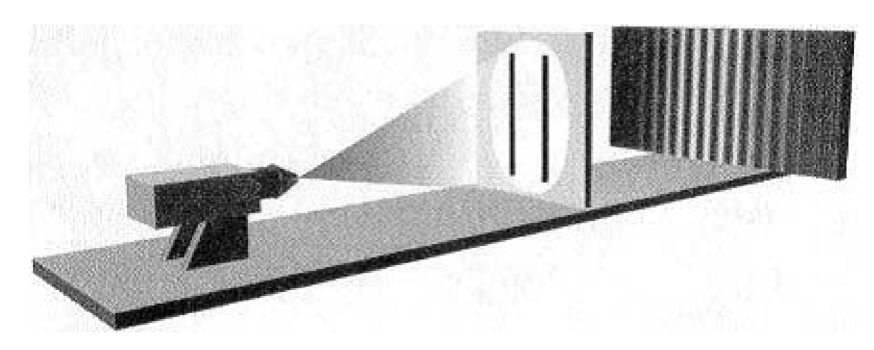


Figura 4.8 Si la luz es una onda, entonces cuando ambas rendijas están abiertas habrá interferencia entre las porciones de la onda que emergen de cada rendija.

Pero Einstein, el hombre que echó a pique la tan reverenciada teoría de la gravedad de Newton, parece haber resucitado el modelo de la luz hecha de partículas de Newton, mediante la introducción de los fotones. Por supuesto, seguimos enfrentándonos a la misma pregunta: ¿cómo puede la perspectiva de la luz como partículas justificar el patrón de interferencias que se muestra en la Figura 4.8? A primera vista, podría usted plantear la siguiente sugerencia. El agua está compuesta por moléculas H_2O —las «partículas» del agua—. Sin embargo, cuando muchas de estas moléculas se desplazan conjuntamente, pueden producir ondas acuáticas con las subsiguientes propiedades de interferencia que se ilustran en la Figura 4.7. Así pues, podría parecer razonable intuir que las propiedades de la onda, tales como el espectro de interferencias, pueden derivarse de considerar la luz como partículas, siempre y cuando un número enorme de fotones, las «partículas» de la luz, esté involucrado.

No obstante, en la realidad el mundo microscópico es mucho más sutil. Incluso cuando la intensidad de la fuente de luz de la Figura 4.8 se debilite cada vez más, llegando finalmente al momento en que fotones *individuales* se disparen *de uno en uno* contra la barrera —por ejemplo a una velocidad de un fotón cada diez segundos — la placa fotográfica resultante *todavía* seguirá teniendo el aspecto de la que se puede ver en la Figura 4.8: con tal de que esperemos el tiempo suficiente para que un gran número de estos paquetes aislados de luz atraviese las rendijas y cada uno de ellos quede grabado mediante un punto único allí donde choca con la placa fotográfica, estos puntos se reunirán para formar la imagen de un espectro de interferencias, la que se recoge en la Figura 4.8. Esto es asombroso. ¿Cómo pueden esas partículas fotón *individuales* que pasan secuencialmente a través de la pantalla

de la pantalla y chocan por separado contra la placa fotográfica ponerse de acuerdo para producir las bandas claras y oscuras de las ondas que interfieren entre sí? El razonamiento convencional nos dice que todos y cada uno de los fotones atraviesan por la rendija de la izquierda o por la de la derecha, por lo que sería de esperar que se produjera el espectro de la Figura 4.6. Pero no sucede así.

Si a usted no le ha desconcertado este comportamiento de la naturaleza, esto quiere decir que, o bien lo había visto ya antes y está de vuelta de todo, o la descripción hecha hasta ahora no ha sido lo suficientemente vívida. Por si acaso ha sido lo último, vamos a explicarlo otra vez, pero de una manera algo diferente. Cerramos la rendija de la izquierda y disparamos los fotones uno a uno contra la barrera. Algunos la atraviesan, otros no. Los que lo hacen, crean una imagen en la placa fotográfica, punto a punto, que aparece como se muestra en la Figura 4.4. A continuación, realizamos el experimento otra vez con una nueva placa fotográfica, pero ahora abrimos las dos rendijas. Es natural pensar que el único cambio que esto va a producir es un aumento en el número de fotones que atraviesan la barrera y chocan contra la placa fotográfica, exponiendo la película a una mayor cantidad de luz total que en la primera prueba del experimento. Sin embargo, al examinar después la imagen producida, se ve que no sólo hay lugares que estaban oscuros en el primer experimento y ahora aparecen claros, como se podía esperar, sino que también hay lugares que en el primer experimento estaban claros y ahora aparecen oscuros, como en la Figura 4.8. *Aumentando* el número de fotones que chocan contra la placa fotográfica, lo que se ha conseguido es *disminuir* la claridad en ciertas zonas. De alguna manera, separadas en el tiempo, las partículas fotón individuales han podido anularse mutuamente. Consideremos lo absurdo de este resultado: algunos fotones que habrían atravesado la rendija de la derecha y chocado contra la película en una de las bandas oscuras de la Figura 4.8, no lo pueden hacer cuando está abierta la rendija de la *izquierda* (y es la razón por la que la banda correspondiente está ahora oscura). Pero ¿cómo es posible que un minúsculo haz de luz que atraviesa una rendija se vea afectado por el hecho de que la *otra* esté o no abierta? Como indicó Feynman, es tan extraño como si disparáramos con una ametralladora contra la pantalla y, cuando ambas rendijas están abiertas, unas balas disparadas de manera independiente y separada se anularan de algún modo mutuamente, dejando un espectro de posiciones intactas en la diana —posiciones que, sin embargo, *sí son* alcanzadas cuando sólo se abre una rendija de la barrera—.

Estos experimentos demuestran que las partículas de luz de Einstein son bastante diferentes de las de Newton. De algún modo, los fotones —aunque son partículas— tienen también unas características similares a las de las ondas. El hecho de que la energía de estas partículas esté determinada por una característica propia de las ondas —la frecuencia— es la primera pista de que se está produciendo una extraña unión.

Pero el efecto fotoeléctrico y el experimento de la doble rendija hacen realmente que nos demos cuenta de cuál es el tema. El efecto fotoeléctrico muestra que la luz tiene propiedades de las partículas. El experimento de la doble rendija muestra que la luz posee las propiedades de interferencias de las ondas. Ambos juntos demuestran que la luz *tiene propiedades de las ondas y de las partículas al mismo tiempo*. El mundo microscópico exige que abandonemos la idea intuitiva de que una cosa es o bien una onda o una partícula, y aceptemos la posibilidad de que sea *ambas* cosas. Aquí es donde empieza a verse el sentido de la afirmación de Feynman de que «Nadie entiende la mecánica cuántica». Podemos proponer expresiones tales como «dualidad onda-partícula». Existe la posibilidad de traducir estas palabras en un formalismo matemático que describe los experimentos del mundo real con una asombrosa exactitud. Pero es extremadamente difícil comprender intuitivamente a un nivel profundo esta deslumbrante característica del mundo microscópico.

Las partículas de la materia son también ondas

En las primeras décadas del siglo XX, muchos de los físicos teóricos más importantes intentaron incansablemente desarrollar una explicación matemáticamente válida y físicamente coherente para estas características, hasta ahora desconocidas, de la realidad. Por ejemplo, bajo la dirección de Niels Bohr en Copenhague se realizaron unos avances sustanciales en la explicación de las propiedades de la luz emitida por átomos de hidrógeno incandescentes. Pero este y otros trabajos anteriores a mediados de la década de 1920 fueron más una unión improvisada de las ideas del siglo XIX con los conceptos cuánticos recién descubiertos, que un marco coherente para la comprensión del universo físico. Comparada con el marco claro y lógico de las leyes del movimiento de Newton o la teoría electromagnética de Maxwell, esta teoría cuántica, parcialmente desarrollada, se encontraba en un estado caótico.

En 1923, un joven aristócrata francés, el príncipe Louis de Broglie, añadió un nuevo elemento a este conflicto cuántico, un elemento que en breve serviría para anunciar la existencia de un marco matemático para la moderna mecánica cuántica y que le valió en 1929 el premio Nobel de física. Inspirado por una línea de razonamiento basada en la relatividad especial de Einstein, De Broglie sugirió que la dualidad onda-partícula no sólo se podía aplicar a la luz sino también a la materia. Dicho en pocas palabras, afirmaba en su razonamiento que la fórmula de Einstein $E = mc^2$ relaciona la masa con la energía, que Planck y Einstein habían relacionado la energía con la frecuencia de las ondas y que, por consiguiente, combinando ambas

cosas, la masa debería tener también una expresión en forma de onda. Después de abrirse paso meticulosamente a través de esta línea de pensamiento, sugirió que, del mismo modo que la luz es un fenómeno ondulatorio para el que la teoría cuántica demuestra que existe una descripción igualmente válida en términos de partículas, también un electrón —al que normalmente consideramos como una partícula— podría tener una descripción igualmente válida en términos de ondas. Einstein aceptó inmediatamente y con agrado la idea de De Broglie, puesto que era una consecuencia natural de sus propias contribuciones sobre la relatividad y los fotones. A pesar de esto, no hay nada que pueda sustituir a una prueba experimental. Dicha prueba llegaría pronto a través de los trabajos de Clinton Davisson y Lester Germer.

Hacia mediados de la década de 1920, Davisson y Germer, físicos experimentales de la empresa telefónica Bell, estaban estudiando cómo rebota un haz de electrones en un trozo de níquel. El único detalle que nos interesa aquí es que, en este experimento, los cristales de níquel actúan de una forma muy parecida a las dos rendijas del experimento reflejado en las figuras de la sección anterior —de hecho, es totalmente correcto considerar este experimento como el mismo que ilustraban las figuras, con la diferencia de que se utiliza un haz de electrones en vez de un haz de luz—. Adoptaremos este punto de vista. Cuando Davisson y Germer examinaron los electrones que atravesaban las dos rendijas de la barrera, haciendo que chocaran contra una pantalla fosforescente que grababa mediante un punto claro el lugar del impacto de cada electrón —en esencia, lo mismo que sucede dentro de un aparato de televisión— descubrieron algo importante. Apareció un espectro muy semejante al de la Figura 4.8. Por consiguiente, su experimento demostraba que los electrones presentan fenómenos de interferencia, un signo revelador de la existencia de *ondas*. En los puntos oscuros de la pantalla fluorescente, los electrones de alguna forma «se anulaban mutuamente», exactamente igual que los picos y los senos de las ondas en el agua. Aunque el haz de electrones disparados se «afinara» de tal modo que, por ejemplo, se emitiera sólo un electrón cada diez segundos, los electrones seguirían formando individualmente las bandas claras y oscuras, marcando un punto cada vez. De algún modo, al igual que los fotones, los electrones individuales «interfieren» unos con otros en el sentido de que estos electrones individuales, en el transcurso del tiempo, reconstruyen el espectro de interferencias asociado con las ondas. Nos vemos en la ineludible necesidad de concluir que el electrón incorpora una característica similar a la de las ondas, conjuntamente con su definición más habitual como partícula.

Aunque hemos explicado esto en el caso de los electrones, hay experimentos similares que llevan a la conclusión de que *toda* la materia tiene características semejantes a las de las ondas. Pero ¿cómo concuerda esto con nuestra experiencia de la materia en el mundo real, que la ve como algo sólido y firme, nunca como una

onda? En cualquier caso, De Broglie desarrolló una fórmula para la longitud de onda de las ondas de la materia, en la que se demuestra que la longitud de onda es proporcional a la constante de Planck $\hbar$. (Más concretamente, la longitud de onda viene dada por la división entre $\hbar$ y el momento del cuerpo material). Dado que $\hbar$ tiene un valor tan pequeño, las longitudes de onda resultantes son igualmente minúsculas comparadas con las dimensiones habituales del mundo que percibimos. Éste es el motivo por el cual el carácter de similitud con las ondas que presenta la materia sólo llega a ser directamente constatable en investigaciones microscópicas llevadas a cabo meticulosamente. Del mismo modo que el gran valor numérico de c, la velocidad de la luz, oculta en gran medida la auténtica naturaleza del espacio y del tiempo, el pequeño valor de $\hbar$ disimula el aspecto de onda de la materia en la experiencia cotidiana directa.

¿Ondas de qué?

El fenómeno de interferencia descubierto por Davisson y Germer hizo que fuera evidente de una manera tangible la naturaleza similar a la de las ondas que tienen los electrones. Pero ¿ondas de *qué*? Una de las primeras sugerencias al respecto fue la que hizo el físico austríaco Erwin Schrödinger, en el sentido de que las ondas eran electrones «partidos y dispersados». Esto expresaba en cierto modo algo del «sentido» que puede tener hablar de una onda electrónica, pero resultaba demasiado burdo. Cuando se parte algo, una parte está aquí y otra allí. Sin embargo, es imposible encontrar medio electrón o un tercio de electrón o cualquier otra fracción de un electrón. Esto hace difícil entender qué es realmente un electrón partido y dispersado. Como alternativa, en 1926, el físico alemán Max Born refinó agudamente la interpretación de la onda electrónica que había hecho Schrödinger, y es esta interpretación refinada —ampliada por Bohr y sus colegas— la que seguimos utilizando hoy en día. La sugerencia planteada por Born es uno de los aspectos más extraños de la teoría cuántica, pero, no obstante, está respaldada por una cantidad enorme de datos experimentales. Afirmó que una onda electrónica se debe interpretar desde el punto de vista de la *probabilidad*. Los lugares en que la magnitud (un poco más correcto es decir el cuadrado de la magnitud) de la onda es *grande* son aquellos lugares en que es más *probable* encontrar el electrón; los lugares en que la magnitud es pequeña son aquellos en que es *menos probable* encontrarlo. Un ejemplo de esto se ilustra en la Figura 4.9.

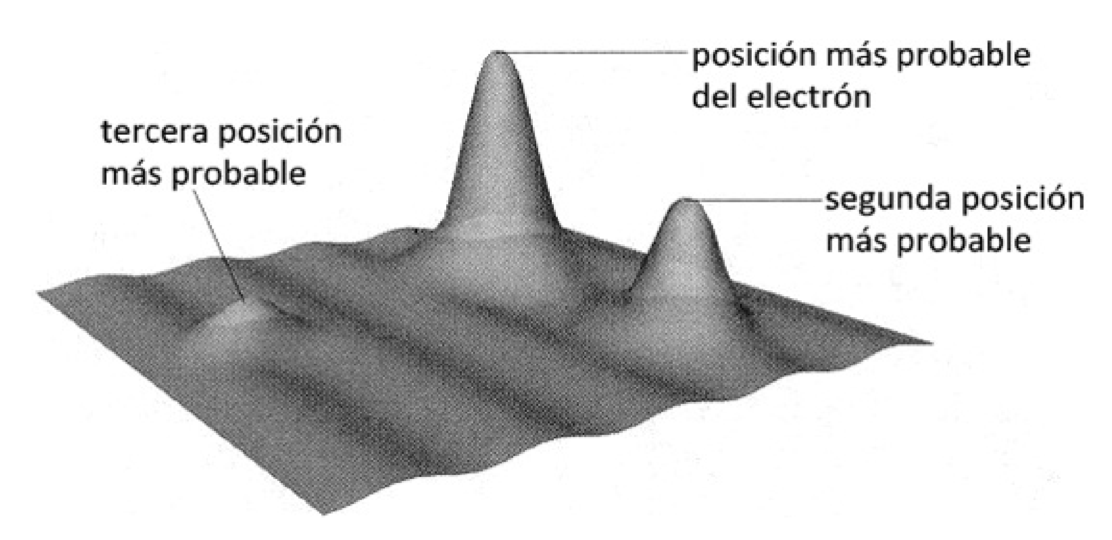


Figura 4.9 La onda asociada a un electrón alcanza la magnitud máxima allí donde es más probable encontrar al electrón, y se hace progresivamente menor en lugares donde es menos probable encontrarlo.

Esta idea es ciertamente peculiar. ¿Qué tiene que ver la probabilidad en la formulación de la física fundamental? Estamos acostumbrados a que la probabilidad aparezca en relación con las carreras de caballos, los lanzamientos de monedas y en la mesa de la ruleta, pero en estos casos lo que refleja es un conocimiento *incompleto* por nuestra parte. Si conociéramos *con exactitud* la velocidad de la rueda de la ruleta, el peso y la dureza de la bola blanca, su posición y velocidad cuando cae en la rueda, las especificaciones exactas del material del cual están hechos los cubículos de los números, etc., y si pudiéramos utilizar unos ordenadores lo suficientemente potentes como para realizar todos los cálculos, podríamos, según la física clásica, predecir con seguridad dónde irá a parar la bola. Los casinos confían en nuestra imposibilidad de conseguir toda esta información y de hacer todos los cálculos necesarios antes de realizar una apuesta. Pero vemos que la probabilidad, tal como se entiende en relación con la mesa de la ruleta, no refleja nada que sea fundamental con respecto al modo en que funciona el mundo. Por el contrario, la mecánica cuántica introduce el concepto de probabilidad en el universo a un nivel mucho más profundo. Según Born y más de medio siglo de sucesivos experimentos, la naturaleza ondulatoria de la materia implica que ésta se ha de explicar fundamentalmente de una manera probabilística. En el caso de objetos macroscópicos, como una taza de café o la rueda de una ruleta, la regla de De Broglie indica que el carácter ondulatorio es prácticamente imperceptible, y en la mayoría de los casos ordinarios se puede ignorar completamente la probabilidad asociada de que habla la mecánica cuántica. Pero a nivel microscópico sabemos que lo mejor que se puede hacer es decir que cada electrón tiene una probabilidad específica de encontrarse en un lugar determinado.

La interpretación probabilística tiene la virtud de que, si una onda electrónica hace lo que otras pueden hacer, —por ejemplo, chocar contra algún obstáculo y desarrollar todo tipo de ondulaciones diferentes— esto no significa que el electrón se

haya hecho añicos. Al contrario, significa que existen varios lugares donde se *podría* encontrar ese electrón con una probabilidad nada despreciable. En la práctica esto significa que si un experimento concreto relativo a un electrón se repite una y otra vez de una manera totalmente idéntica, *no* se obtendrá una y otra vez la misma respuesta para la posición precisa del electrón. Por el contrario, las sucesivas repeticiones del experimento producirán toda una variedad de resultados diferentes, cumpliéndose la propiedad de que el número de veces que se encuentra el electrón en una posición dada depende de la forma de la onda de probabilidad de dicho electrón. Si la onda de probabilidad (más exactamente, el cuadrado de la onda de probabilidad) es en el lugar A el doble que en el lugar B, entonces la teoría predice que en una sucesión de muchas repeticiones del experimento el electrón se encontrará en el lugar A con una frecuencia que es el doble de las veces que se encontrará en el lugar B. No se pueden predecir resultados exactos para los experimentos; lo más que podemos hacer es predecir la probabilidad de que un resultado determinado *podría* obtenerse.

Aun así, en la medida en que podamos determinar matemáticamente la forma precisa de las ondas de probabilidad, sus predicciones probabilísticas *se pueden* comprobar repitiendo un determinado experimento numerosas veces, midiendo así experimentalmente la probabilidad de conseguir un resultado concreto u otro. Unos pocos meses después de que De Broglie formulara su sugerencia, Schrödinger dio el paso decisivo hacia este objetivo, desarrollando una fórmula que determina la forma y la evolución de las ondas de probabilidad o, según el nombre que recibieron, las *funciones de onda*. No se tardó mucho tiempo en utilizar la ecuación de Schrödinger y la interpretación probabilística para realizar unas predicciones asombrosamente exactas. Por consiguiente, hacia 1927 la inocencia clásica ya se había perdido. Habían pasado los días de un universo con mecanismo de relojería cuyos componentes individuales se pusieron en movimiento en algún momento del pasado y se sometían obedientemente a un destino que era ineludible y estaba determinado de manera única. De acuerdo con la mecánica cuántica, el universo evoluciona según un formalismo matemático riguroso y preciso, pero este marco sólo determina la probabilidad de que llegue algún futuro concreto, sin decir qué futuro será realmente el que llegue.

Muchos consideraron esta conclusión preocupante o incluso totalmente inaceptable. Einstein fue uno de ellos. En uno de los pronunciamientos más tradicionales de la física, Einstein advertía a los incondicionales de la teoría cuántica que «Dios no juega a los dados con el universo». Pensaba que la probabilidad estaba apareciendo en el ámbito de la física fundamental por una sutil versión de la razón por la que aparece en la rueda de la ruleta: un cierto estado incompleto que está en la base de nuestra capacidad de comprender. En el universo, según el punto de vista de Einstein, no había espacio para un futuro cuya forma exacta incluye un elemento

aleatorio. La física debía predecir cómo evoluciona el universo, y no meramente la probabilidad de que alguna evolución particular pueda producirse. Sin embargo, todos los experimentos, uno tras otro —alguno de los más convincentes fueron realizados después de su muerte— confirmaron de manera clara que Einstein estaba equivocado. Como ha dicho el físico teórico británico Stephen Hawking, en este punto «Einstein estaba confundido, no la teoría cuántica».[28]

No obstante, el debate sobre lo que realmente significa la mecánica cuántica continúa realizándose. Todo el mundo está de acuerdo en cómo utilizar las ecuaciones de la teoría cuántica para realizar predicciones exactas. Pero no hay consenso en lo que significa realmente tener ondas de probabilidad, ni tampoco en cómo «elige» una partícula cuál de sus muchos futuros posibles ha de seguir, ni siquiera en si realmente elige o, por el contrario, se escinde en fragmentos como un afluente que se bifurca para vivir todos los futuros posibles en un campo, siempre en expansión, de universos paralelos. Estas cuestiones de interpretación merecen por sí solas y de pleno derecho una discusión que ocuparía todo un libro y, de hecho, hay una gran cantidad de libros excelentes que se adhieren a uno u otro modo de pensar sobre la teoría cuántica. Pero lo que es innegable es que, independientemente de cómo interprete cada uno la mecánica cuántica, ésta pone de manifiesto indiscutiblemente que el universo se basa en principios que, desde la perspectiva de nuestra experiencia cotidiana, resultan extraños.

La metalección que ofrecen conjuntamente la relatividad y la mecánica cuántica dice que, cuando comprobamos a fondo los funcionamientos fundamentales que se dan en el universo, podemos descubrir aspectos que son muy diferentes de lo que esperamos. La audacia de formular preguntas profundas puede requerir una flexibilidad imprevista si vamos a aceptar las respuestas.

La perspectiva de Feynman

Richard Feynman fue uno de los físicos teóricos más importantes que han existido desde Einstein. Aceptó plenamente la esencia probabilística de la mecánica cuántica, pero en los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial aportó un nuevo y poderoso modo de pensar en la teoría cuántica. Tomando como punto de partida las predicciones numéricas, la perspectiva de Feynman *concuerda exactamente* con todo lo que se había planteado anteriormente. Sin embargo; su formulación es bastante diferente. A continuación, vamos a explicarla en el contexto del experimento de la doble rendija para electrones.

Lo que preocupa con respecto a la Figura 4.8 viene dado por el hecho de que consideramos que cada electrón atraviesa, o bien la rendija de la izquierda, o bien la de la derecha, por lo que esperamos la unión de las Figuras 4.4 y 4.5, como se ve en la Figura 4.6, para representar los datos resultantes de una manera exacta. Un electrón que atraviese la rendija de la derecha no debería preocuparse de que haya también una rendija a la izquierda, y viceversa. Pero, de alguna forma lo hace. El espectro de interferencia que se genera requiere una superposición y un entremezclado entre *algo* que es sensible a ambas rendijas, aunque disparemos los electrones de uno en uno. Schrödinger, De Broglie y Born explicaron este fenómeno asociando una onda de probabilidad a cada electrón. Como las ondas del agua de la Figura 4.7, la onda de probabilidad del electrón «ve» ambas rendijas y está sometida al mismo tipo de interferencia por entremezclado. Los lugares donde la onda de probabilidad se ve aumentada por el entremezclado, como los lugares de empuje significativo de la Figura 4.7, son lugares en que es probable encontrar al electrón; los lugares donde la onda de probabilidad disminuye por el entremezclado, como los lugares de mínimo o nulo empuje de la Figura 4.7, son lugares en que es improbable o imposible que se encuentre el electrón. Los electrones chocan de uno en uno contra la pantalla fosforescente, distribuyéndose de acuerdo con su perfil probabilístico, y así crean un espectro de interferencias como el que se ve en la Figura 4.8.

Feynman tomó un camino diferente. Desafió la suposición clásica fundamental según la cual cada electrón, o bien atraviesa la rendija izquierda, o la derecha. Se podría pensar que esto es una propiedad tan básica de cómo funcionan las cosas que el desafío resulta fatuo. Después de todo, ¿no se podría *mirar* en la zona que se encuentra entre ambas rendijas y la pantalla fosforescente, para aclarar cuál es la rendija que atraviesa cada electrón? Esto se puede hacer, pero de esa manera *se modifica* el experimento. Para *ver* el electrón se ha de *hacerle* algo —por ejemplo se puede iluminar, es decir, hacer que unos fotones reboten sobre él—. Ahora bien, con las escalas de la vida cotidiana, los fotones actúan como pequeñas sondas insignificantes que rebotan sobre los árboles, las obras de arte y las personas, sin producir esencialmente ningún efecto sobre el estado de movimiento de esos cuerpos materiales comparativamente grandes. Pero los electrones son pequeños manojos de materia. Independientemente de la cautela con que se lleve adelante la decisión relativa a qué rendija se ha de atravesar, los fotones que hacen salir al electrón necesariamente afectan a su movimiento posterior. Y este cambio en el movimiento cambia también los resultados del experimento. Si perturbamos el experimento justo lo suficiente para determinar la rendija a través de la cual pasa cada electrón, los experimentos muestran que los resultados cambian con respecto a los de la Figura 4.8 y se hacen más parecidos a los de la Figura 4.6. La teoría cuántica garantiza que, una vez ha quedado establecido que cada electrón ha atravesado, o bien la rendija de la

izquierda o la de la derecha, la interferencia entre las dos rendijas desaparece.

Y así, resulta que Feynman tenía razón al formular su desafío ya que —aunque nuestra experiencia del mundo parece exigir que cada electrón atraviese por una u otra rendija— hacia finales de la década de 1920, los físicos descubrieron que cualquier intento de verificar esta cualidad aparentemente básica de la realidad arruina el experimento.

Feynman afirmó que cada uno de los electrones que se abren paso hacia la pantalla fosforescente atraviesa realmente *ambas* rendijas. Suena como una locura, pero espere y verá: puede ser aún más fuerte. Feynman argumentó que, mientras viaja desde la fuente hasta un punto determinado de la pantalla fosforescente, cada electrón en realidad atraviesa *todas las trayectorias posibles simultáneamente*; en la Figura 4.10 se representan algunas de estas trayectorias.

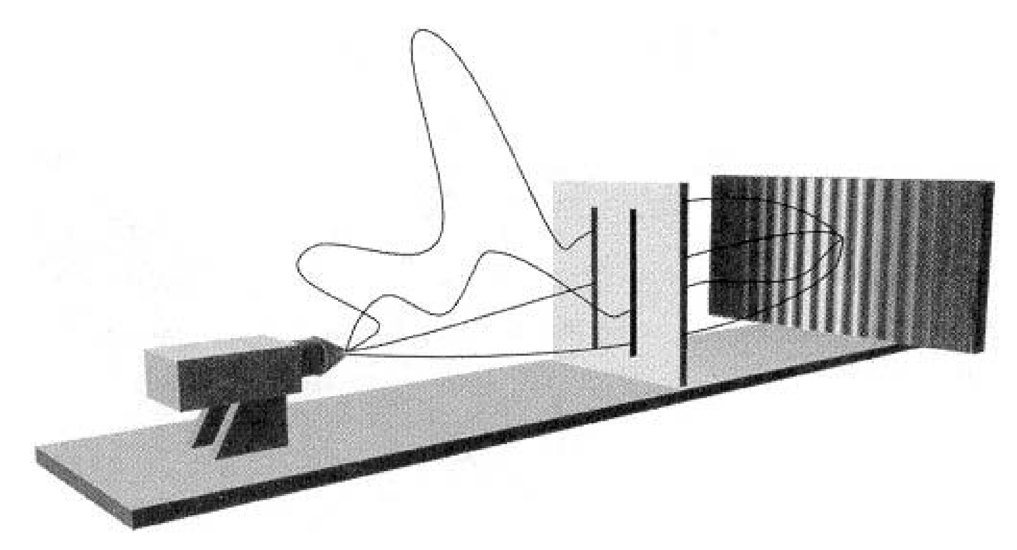


Figura 4.10 Según la formulación de Feynman de la mecánica cuántica, se debe considerar que las partículas se desplazan de un lugar a otro recorriendo todas las trayectorias posibles. Aquí se muestran unas pocas de las infinitas trayectorias de un único electrón que se desplaza desde la fuente de emisión hasta la pantalla fosforescente. Obsérvese que este único electrón atraviesa en realidad ambas rendijas.

El electrón pasa tranquilamente a través de la rendija de la izquierda. Simultáneamente, también pasa tranquilamente a través de la rendija de la derecha. Se dirige hacia la rendija de la izquierda, pero de repente cambia su trayectoria y se dirige a atravesar la de la derecha. Serpentea hacia atrás y hacia delante, pasando finalmente a través de la rendija de la izquierda. Realiza un largo viaje a la galaxia de Andrómeda y luego vuelve para atravesar la rendija de la izquierda, de camino hacia la pantalla. Y sigue así una y otra vez —el electrón, según Feynman, va «olfateando» simultáneamente *todos* los caminos posibles que conectan su punto de partida con su destino final.

Feynman demostró que podía asignar un número a cada uno de estos caminos, de tal modo que su promedio combinado produjera exactamente el mismo resultado que

daba la probabilidad calculada utilizando el planteamiento de la función de onda. De este modo, desde el punto de vista de Feynman, no se necesita asociar ninguna onda de probabilidad al electrón. En vez de eso, tenemos que imaginar algo que es igual de extraño, o aún más. La probabilidad de que el electrón —siempre considerado, en todos los aspectos, como una partícula— llegue a cualquier punto dado de la pantalla se obtiene a partir del efecto combinado de todas las trayectorias posibles para llegar allí. Esto se conoce dentro de la mecánica cuántica como el planteamiento de las «trayectorias sumadas» de Feynman.[29]

Llegados a este punto, nuestra formación clásica se rebela: ¿cómo puede un electrón seguir distintas trayectorias *simultáneamente* y, por añadidura, nada menos que un número infinito de ellas? Esto parece una objeción razonable, pero la mecánica cuántica —la física de nuestro mundo— exige que evitemos estas quejas tan pedestres. Los resultados de los cálculos que se realizan utilizando el planteamiento de Feynman coinciden con los del método de la función de onda, que a su vez coinciden con los resultados experimentales. Hemos de permitir que sea la naturaleza quien diga qué es acertado y qué no lo es. Como Feynman escribió en una ocasión: «[La mecánica cuántica] describe la naturaleza como algo absurdo desde el punto de vista del sentido común. Pero concuerda plenamente con las pruebas experimentales. Por lo tanto, espero que ustedes puedan aceptar a la naturaleza tal como es: absurda».[30]

Sin embargo, a pesar de lo absurda que pueda ser la naturaleza cuando la examinamos a escalas microscópicas, las cosas deben conjugarse de tal manera que recobremos los sucesos prosaicos y familiares del mundo que percibimos según las escalas habituales. Para lograr esto, Feynman demostró que, si examinamos el movimiento de objetos de gran tamaño —como pelotas de béisbol, aeroplanos o planetas, todos ellos grandes en comparación con las partículas subatómicas— su regla de asignar números a cada trayectoria garantiza que *todas las trayectorias excepto una se anulan la una a la otra* cuando se combinan sus contribuciones. En efecto, sólo una de las infinitas trayectorias importa por lo que respecta al movimiento del objeto. Y esta trayectoria es precisamente la que surge a partir de las leyes del movimiento de Newton. Éste es el motivo por el cual en el mundo cotidiano nos *parece* que los objetos —como en el caso de una pelota lanzada al aire— siguen una sola trayectoria única y predecible desde su origen hasta su destino. Sin embargo, por lo que se refiere a objetos microscópicos, la regla de Feynman de asignar números a las trayectorias muestra que son muchas las distintas trayectorias que pueden intervenir, y a menudo lo hacen, en el movimiento de un objeto. Por ejemplo, en el experimento de la doble rendija, algunas de estas trayectorias atraviesan diferentes rendijas, dando lugar al espectro de interferencias observado. En el ámbito de lo microscópico, por consiguiente, no podemos asegurar que un electrón atraviese

sólo una rendija o la otra. El espectro de interferencias y la formulación alternativa de Feynman para la mecánica cuántica atestiguan enfáticamente lo contrario.

Del mismo modo que las distintas interpretaciones de un libro o de una película nos pueden parecer más o menos útiles para ayudamos a comprender diferentes aspectos de la obra, lo mismo se puede decir de los diferentes planteamientos que se han formulado en relación con la mecánica cuántica. Aunque sus predicciones siempre concuerdan en todo, el planteamiento de la función de onda y el de la suma de trayectorias de Feynman nos ofrecen maneras distintas de pensar sobre lo que está sucediendo. Como veremos más adelante, para algunas aplicaciones un planteamiento u otro puede aportarnos un marco explicativo de valor incalculable.

Rareza cuántica

A estas alturas del libro, ya tendrá el lector una idea sobre el modo radicalmente nuevo en que funciona el universo según la mecánica cuántica. Si aún no ha caído víctima de las afirmaciones de vértigo formuladas por Bohr, la rareza cuántica que ahora vamos a comentar tendría que hacerle sentirse un poco mareado.

Aún más que con las teorías de la relatividad, es difícil aceptar visceralmente la mecánica cuántica —pensar como una persona en miniatura nacida y criada en un ambiente microscópico—. Sin embargo, hay un aspecto de la teoría que puede hacer de poste indicador para su intuición, ya que es el sello que marca la diferencia entre el razonamiento cuántico y el razonamiento clásico. Se trata del *principio de incertidumbre,* descubierto por el físico alemán Werner Heisenberg en 1927.

Este principio se deriva de una objeción que se le ha podido ocurrir al lector anteriormente. Dijimos que el acto de determinar la rendija a través de la cual pasa el electrón (su posición) necesariamente perturba su posterior movimiento (su velocidad). Pero, del mismo modo que podemos aseguramos de la presencia de alguien tocándole suavemente o dándole una palmada con entusiasmo en la espalda, ¿por qué no podemos determinar la posición del electrón mediante una fuente de luz «aún más suave» con el fin de lograr producir un impacto menor en su movimiento? Desde el punto de vista de la física del siglo XIX, sí que podemos. Utilizando una lámpara que dé una luz todavía más tenue (y un detector de luz aún más sensible) podemos producir un impacto cada vez más pequeño en el movimiento del electrón. Sin embargo, la propia mecánica cuántica señala un defecto en este razonamiento. Cuando bajamos la intensidad de la fuente de luz, sabemos que estamos disminuyendo el número de fotones que emite. Una vez que llegamos a emitir los

electrones de uno en uno, no podemos suavizar más la luz sin apagarla realmente. En la mecánica cuántica existe un límite fundamental para la «suavidad» de nuestra prueba. Por lo tanto, al ir a medir su posición, siempre causamos un efecto perturbador mínimo, una alteración en la velocidad de los electrones.

Bien, esto es casi correcto. La ley de Planck nos dice que la energía de un fotón es proporcional a su frecuencia (e inversamente proporcional a su longitud de onda). Por consiguiente, utilizando luz de una frecuencia cada vez más baja (de longitud de onda cada vez más larga) podemos conseguir unos fotones cada vez más débiles. Pero aquí está la trampa. Cuando hacemos que una onda rebote en un objeto, la información que recibimos sólo alcanza a determinar la posición del objeto dentro de un *margen de error igual a la longitud de dicha onda*. Para hacemos una idea intuitiva de este hecho tan importante, supongamos que intentamos determinar la ubicación de una gran roca ligeramente sumergida utilizando el modo en que dicha roca afecta a las olas oceánicas que pasan junto a ella. Cuando estas olas se acercan a la roca, forman una sucesión bien ordenada formada por un ciclo de ola ascendente y descendente seguido de otros similares. Después de pasar junto a la roca, cada ciclo de ola sufre una distorsión —la señal que indica la presencia de la roca sumergida—. Sin embargo, lo mismo que el conjunto más fino de trazos marcados en una regla, los ciclos de las olas que ascienden y descienden son las unidades mínimas que constituyen la sucesión de olas y, por consiguiente, sólo con examinar cómo es el efecto perturbador que sufren, podemos determinar la ubicación de la roca, pero sólo dentro de un margen de error igual a la longitud de cada ciclo de ola, es decir, la longitud de onda, considerando el movimiento de la ola como una onda. En el caso de la luz, cada uno de los fotones que la componen es, en cierto modo, el ciclo de una ola (quedando determinada la altura del ciclo de una onda por el número de fotones); por lo tanto, un fotón se puede utilizar para determinar la ubicación de un objeto con un margen de error de tan sólo una longitud de onda.

De esta manera, nos enfrentamos a una ley de equilibrio dentro de la mecánica cuántica. Si utilizamos luz de alta frecuencia (corta longitud de onda) podremos localizar un electrón con mayor precisión. Pero los fotones de alta frecuencia tienen mucha energía y por consiguiente causarán una gran perturbación en la velocidad del electrón. Si utilizamos luz de baja frecuencia (larga longitud de onda) minimizaremos el impacto del movimiento de los electrones, ya que los fotones que componen esta luz tienen comparativamente poca energía, pero sacrificaremos la precisión en la determinación de la posición del electrón. Heisenberg cuantificó esta oposición y halló una relación matemática entre la precisión con la que se mide la posición del electrón y la precisión con que se mide su velocidad. Descubrió —en la línea de nuestra discusión— que cada una es inversamente proporcional a la otra: una mayor precisión al medir la posición implica necesariamente una mayor imprecisión en la

medición de la velocidad, y viceversa. Además, lo que es más importante, aunque hemos vinculado nuestra discusión a la utilización de un medio concreto de determinar el paradero del electrón, Heisenberg demostró que este tira y afloja entre la precisión de la posición y la de las mediciones de la velocidad es un hecho fundamental que se da independientemente de los instrumentos que se utilicen o del procedimiento empleado. A diferencia del marco establecido por Newton o incluso del que estableció Einstein, en los que el movimiento de una partícula se determina dando su posición y su velocidad, la mecánica cuántica muestra que a nivel microscópico *no es posible conocer al mismo tiempo ambas características con total precisión*. Además, cuanto mayor sea la precisión con que se conoce una de ellas, menor es la precisión con que conocemos la otra. Aunque hemos explicado esto hablando de electrones, estas leyes se aplican directamente a *todos* los componentes de la naturaleza.

Einstein trató de minimizar este distanciamiento de la física clásica argumentando que, aunque el razonamiento cuántico ciertamente parece limitar nuestro *conocimiento* de la posición y la velocidad, el electrón todavía *tiene* una posición y una velocidad determinadas, es decir, exactamente lo que habíamos pensado siempre. Pero, durante las dos últimas décadas, el avance teórico encabezado por el fallecido físico irlandés John Bell y los resultados experimentales de Alain Aspect y sus colaboradores han demostrado convincentemente que Einstein estaba equivocado. Los electrones —y todo lo demás a ese respecto-no se pueden determinar como algo que simultáneamente está en una ubicación tal y tal *y* tiene una velocidad tal y tal. La mecánica cuántica demuestra que no sólo es que tal afirmación nunca se podría verificar experimentalmente —como hemos explicado anteriormente— sino que además estaría en contradicción directa con otros resultados experimentales obtenidos más recientemente.

De hecho, si capturáramos un electrón en una caja grande y sólida, y luego aplastáramos los laterales de la caja para precisar su posición con mayor exactitud, nos encontraríamos con que el electrón se pone más y más frenético. Casi como si tuviera un ataque de claustrofobia, el electrón se volvería cada vez más loco y rebotaría contra las paredes de la caja con una velocidad cada vez más frenética e impredecible. La naturaleza no permite que se arrincone a sus componentes. En el bar H-barra, donde nos imaginamos que $\hbar$ es *mucho* mayor que en el mundo real, haciendo así que los objetos cotidianos estén sometidos directamente a efectos cuánticos, los cubos de hielo tamborilean frenéticamente dentro de los vasos de George y Gracie, como si dichos cubos sufrieran también una claustrofobia cuántica. Aunque el bar H-barra es un lugar creado por la fantasía —en realidad, $\hbar$ tiene un valor increíblemente pequeño—, precisamente este tipo de claustrofobia cuántica es una característica general en el ámbito de lo microscópico. El movimiento de las

partículas microscópicas se vuelve cada vez más violento cuando se examina confinándolo a regiones menores del espacio.

El principio de incertidumbre da lugar también a un efecto curioso conocido como *efecto túnel cuántico*. Si se dispara un perdigón de plástico contra un muro de hormigón de tres metros de espesor, la física clásica confirma lo que instintivamente pensamos que va a suceder: el perdigón rebotará volviendo hacia nosotros. La razón es, sencillamente, que el perdigón no tiene energía suficiente para penetrar en un obstáculo tan consistente. Sin embargo, a nivel de partículas fundamentales, la mecánica cuántica muestra inequívocamente que las funciones de onda —es decir, las ondas de probabilidad— de las partículas que constituyen el perdigón tienen todas ellas una parte diminuta que *sale* a través del muro. Esto significa que hay una probabilidad pequeña —pero no nula— de que el perdigón *pueda* realmente penetrar en la pared y salir por el otro lado. ¿Cómo puede suceder esto? La razón de que sucede nos remite, una vez más, al principio de incertidumbre de Heisenberg.

Para comprender esto, supongamos que usted está en la miseria total y se entera de repente de que un pariente lejano ha fallecido en tierras remotas, dejándole una enorme fortuna que usted puede reclamar. El único problema es que usted no tiene dinero para comprar un billete de avión con el que viajar allí. Les explica la situación a sus amigos: si ellos le posibilitan que usted salve la barrera que le separa de su fortuna prestándole temporalmente dinero para comprar el billete, les podrá pagar generosamente a su retorno. Sin embargo, ninguno tiene dinero para hacerle el préstamo. Pero, entonces, usted recuerda que un viejo amigo suyo trabaja en una compañía aérea y acude a él con la misma petición. Este amigo tampoco puede permitirse dejarle el dinero, pero le ofrece una solución. El sistema de contabilidad de la compañía aérea está organizado de tal manera que, si usted envía un giro para el pago del billete dentro de las primeras 24 horas posteriores a su llegada al destino del viaje, nadie sabrá nunca que no se pagó dicho billete antes de la salida del avión. De esta manera, usted podrá reclamar su herencia.

Los procedimientos contables de la mecánica cuántica son bastante similares. Cuando Heisenberg demostró que existe un tira y afloja entre la precisión al medir la posición y la que se puede lograr al medir la velocidad, demostró también que existe un tira y afloja similar entre la precisión en las mediciones de *energías* y el tiempo que se tarda en hacer la medición. La mecánica cuántica afirma que no se puede decir con precisión que una partícula tiene una determinada cantidad de energía en un momento determinado en el tiempo. Una precisión cada vez mayor en las mediciones de energía requiere largos intervalos de tiempo para realizar dichas mediciones. Aproximadamente, esto significa que la energía que tiene una partícula puede fluctuar ampliamente siempre y cuando estas fluctuaciones se produzcan durante un intervalo de tiempo suficientemente corto. Así, del mismo modo que el sistema de contabilidad

de la compañía aérea le «permite» a usted «pedir prestado» el importe de un billete de avión, con tal de que pague usted con la rapidez necesaria, así también la mecánica cuántica permite a una partícula tomar energía «prestada», siempre y cuando pueda luego devolverla dentro de un espacio de tiempo lo bastante rápido, determinado por el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Las matemáticas asociadas a la mecánica cuántica demuestran que cuanto mayor es la barrera de energía, menor es la probabilidad de que esta contabilidad microscópica tan creativa pueda realmente llevarse a cabo. Sin embargo, para las partículas microscópicas que se enfrenten a un bloque de hormigón, pueden, y lo hacen a veces, tomar prestada la energía suficiente para hacer lo que es imposible desde el punto de vista de la física clásica, es decir, entrar momentáneamente y abrirse camino, como por un túnel, a través de una zona en la que inicialmente no podían entrar porque no tenían la energía suficiente. A medida que los objetos que estudiamos se vuelven más y más complicados, porque están compuestos por cada vez más partículas, este efecto túnel puede seguir produciéndose, pero se vuelve muy improbable ya que *todas y cada una* de las partículas tienen que tener la suerte de poder abrirse camino juntas. Pero los asombrosos episodios del cigarro de George que desaparecía, del cubo de hielo que atravesaba la pared del vaso, y de George y Gracie que pasaban a través de la pared del bar, pueden suceder. En una tierra fantástica como aquella donde se encuentra el bar H-barra, en la que suponemos que *ħ* es grande, este efecto túnel es algo habitual. Pero las reglas de la probabilidad de la mecánica cuántica —y, en particular, el pequeño valor de *ħ* en el mundo real— demuestran que si intentáramos cada segundo caminar hacia el interior de un muro sólido en el mundo real, necesitaríamos más tiempo que el total de la edad actual del universo para tener una buena probabilidad de conseguir atravesarlo en alguno de nuestros intentos. Sin embargo, con una paciencia eterna (y mucha longevidad) podríamos —antes o después— salir por el otro lado.

El principio de incertidumbre recoge lo más fundamental de la mecánica cuántica. Características que consideramos normalmente tan básicas que están más allá de toda discusión —que los objetos tienen posiciones y velocidades definidas y que están dotados de una cantidad determinada de energía en cada momento determinado— se ven ahora como meros artilugios de la constante de Planck *(ħ)*, que es tan pequeña según las escalas de nuestro entorno cotidiano. Es de suma importancia el hecho de que, cuando este resultado cuántico se aplica a la estructura del espacio-tiempo, muestra unas imperfecciones fatales en los *hilvanes de la gravedad* y nos conduce al tercer conflicto, el principal, al que se ha enfrentado la física durante el siglo pasado.

Capítulo 5

La necesidad de una Nueva Teoría: Relatividad General vs. Mecánica cuántica

Nuestro conocimiento del universo físico ha llegado a ser muy profundo durante el último siglo. Las herramientas teóricas de la mecánica cuántica y de la relatividad general nos permiten comprender y hacer predicciones comprobables en relación con sucesos físicos que tienen lugar desde los ámbitos atómicos y subatómicos, a través de fenómenos que se producen a escala de galaxias, racimos o clusters de galaxias, y más allá hasta la estructura del propio universo global. Se trata de un logro monumental. Es verdaderamente inspirador que seres confinados en un planeta que gira en una órbita en torno a una estrella común y corriente en los lejanos confines de una galaxia como otra cualquiera, hayan podido, a través del pensamiento y la experimentación, descifrar y abarcar algunas de las características más misteriosas del universo físico. Sin embargo, los físicos, por su propia naturaleza, no se darán por satisfechos hasta que sientan que se ha desvelado el más profundo y fundamental conocimiento del universo. A esto es a lo que aludía Stephen Hawking cuando hablaba de un primer paso hacia el conocimiento de «la mente de Dios».[31]

Es amplia la evidencia de que la mecánica cuántica y la relatividad general no proporcionan este nivel más profundo de comprensión. Dado que sus dominios habituales de aplicabilidad son tan diferentes, la mayor parte de las situaciones requieren el uso de la mecánica cuántica o de la relatividad general, pero no de ambas. Sin embargo, en ciertas condiciones extremas en que los objetos poseen una gran masa y son de un tamaño muy pequeño —en las proximidades del punto central de los agujeros negros, o en la totalidad del universo en el momento del big bang, por nombrar dos ejemplos— se requieren tanto la relatividad general como la mecánica cuántica para llegar a una comprensión adecuada. Pero, como sucede con la mezcla de fuego y pólvora, cuando intentamos combinar la mecánica cuántica y la relatividad general, esta unión acaba en una catástrofe violenta. Hay problemas de física bien formulados que provocan resoluciones disparatadas cuando se mezclan las ecuaciones de ambas teorías. El absurdo a veces toma la forma de una predicción

según la cual la probabilidad de la mecánica cuántica para un proceso determinado no es del 20 por 100, o del 73 por 100, o del 91 por 100, sino *infinita*. ¿Qué demonios significa una probabilidad que es mayor que uno, por no hablar de una probabilidad infinita? Nos vemos obligados a concluir que en esto hay algo gravemente erróneo. Examinando detenidamente las propiedades básicas de la relatividad general y de la mecánica cuántica, podemos identificar lo que ese algo es.

El corazón de la mecánica cuántica

Cuando Heisenberg descubrió el principio de incertidumbre, la física dio un giro de noventa grados, para no volver jamás sobre sus pasos. Las probabilidades, las funciones de onda, las interferencias y los cuantos, todo esto lleva consigo unos modos radicalmente nuevos de ver la realidad. Sin embargo, un físico «clásico» intransigente podría todavía agarrarse a un hilo de esperanza, pensando que, cuando todo estuviera dicho y hecho, estas nuevas orientaciones se sumarían a un marco no muy distante de las viejas maneras de pensar. Pero el principio de incertidumbre corta clara y definitivamente cualquier intento de aferrarse al pasado.

El principio de incertidumbre nos dice que el universo es un lugar frenético cuando se examina a distancias cada vez más cortas y a escalas de tiempo cada vez más breves. Vimos algunas pruebas de esto cuando intentábamos, en el capítulo anterior, fijar la ubicación de partículas elementales como los electrones: proyectando luz de frecuencias cada vez más altas sobre los electrones, medíamos su posición con una precisión cada vez mayor, pero con un coste, ya que nuestras observaciones producían un efecto cada vez más perturbador. Los fotones de alta frecuencia tienen mucha energía y, por lo tanto, dan a los electrones un fuerte «empujón», cambiando significativamente sus velocidades. Como el frenesí existente en una habitación llena de niños, cuyas posiciones momentáneas conocemos con gran exactitud pero no tenemos casi control alguno sobre sus velocidades —la rapidez y dirección del movimiento de cada niño—, esta incapacidad de conocer al mismo tiempo las posiciones y las velocidades de las partículas elementales implica que el ámbito microscópico es intrínsecamente turbulento.

Aunque este ejemplo explica la relación básica entre incertidumbre y frenesí, en realidad sólo nos cuenta una parte de la historia. Nos podría inducir a pensar, por ejemplo, que la incertidumbre sólo se presenta cuando nosotros, torpes observadores de la naturaleza, entramos en escena dando traspiés. Esto *no* es verdad. El ejemplo de un electrón que reacciona violentamente al ser encerrado en una pequeña caja,

tamborileando contra las paredes con una gran velocidad, nos acerca un poco más a la verdad. Incluso sin «golpes directos» del fotón perturbador que le envía el físico experimental, la velocidad del electrón sufre cambios serios e impredecibles de un instante a otro. Sin embargo, tampoco este ejemplo revela las asombrosas características microscópicas de la naturaleza que aparecen en el descubrimiento de Heisenberg. Incluso en el lugar más apacible que pueda imaginarse, como lo es una región vacía del espacio, el principio de incertidumbre nos dice que desde un punto de vista microscópico existe una cantidad tremenda de actividad. Y esta actividad se agita cada vez más a distancias y escalas de tiempo cada vez menores.

La contabilidad cuántica es esencial para aprehender esto. Vimos en el capítulo anterior que, del mismo modo que se puede pedir provisionalmente dinero prestado para superar un importante obstáculo financiero, una partícula tal como un electrón puede pedir prestada energía provisionalmente para superar una barrera física. Esto es cierto, pero la mecánica cuántica nos obliga a llevar esta analogía más lejos, dando un importante paso hacia delante. Supongamos que alguien solicita préstamos compulsivamente y va de amigo en amigo pidiendo dinero. Cuanto más breve es el período de tiempo para el cual un amigo le puede prestar dinero, mayor cuantía será la que pida prestada. Recibir prestado y devolver, una y otra vez; tomar dinero a crédito repetidamente, con una intensidad incansable, sólo para devolverlo a corto plazo. Como las cotizaciones de la bolsa en un día movido como una montaña rusa en Wall Street, la cantidad de dinero que el prestatario compulsivo posee en un momento dado experimenta fluctuaciones extremas, pero cuando todo está dicho y hecho, la contabilidad de sus finanzas muestra que no está mejor de dinero que cuando comenzó.

El principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que una oscilación frenética hacia atrás y hacia delante, de la energía y la cantidad de movimiento se produce constantemente en el universo a distancias e intervalos de tiempo microscópicos. Incluso en una región vacía del espacio —por ejemplo, dentro de una caja vacía— el principio de incertidumbre dice que la energía y la cantidad de movimiento son *inciertos*: fluctúan entre extremos que son más distantes a medida que las dimensiones de la caja y la escala de tiempo a la que se examinan se hacen cada vez menores. Es como si la región del espacio que se encuentra en el interior de la caja fuera un «prestatario» compulsivo de energía y cantidad de movimiento que obtuviera del universo «préstamos» y a continuación los estuviera «amortizando». Pero ¿qué es lo que participa en estos intercambios en, por ejemplo, una tranquila región *vacía* del espacio? Todo. Literalmente. La energía (y también la cantidad de movimiento) es la última divisa convertible. $E = mc^2$ nos dice que la energía se puede convertir en materia y viceversa. Así; si una fluctuación de energía es lo suficientemente grande puede ocasionar instantáneamente, por ejemplo, que se creen

un electrón y su antipartícula correspondiente, el positrón, incluso si la región estaba inicialmente vacía. Puesto que esta energía ha de ser compensada rápidamente, las partículas se aniquilarán mutuamente al cabo de un instante, emitiendo la energía que han tomado prestada para su creación. Lo mismo sucede con todas las demás formas que pueden adoptar la energía y la cantidad de movimiento —otras creaciones y aniquilaciones de partículas, oscilaciones bruscas de los campos electromagnéticos, fluctuaciones de los campos de las fuerzas nuclear débil y nuclear fuerte—. La incertidumbre aplicada a la mecánica cuántica nos dice que, a escalas microscópicas, el universo es un ámbito hormigueante, frenético y caótico. Como Feynman afirmaba en una ocasión, bromeando: «Creación y aniquilación, creación y aniquilación: qué pérdida de tiempo».[32] Dado que la toma de préstamos y su amortización por término medio se compensan mutuamente, una región vacía del espacio tiene un aspecto tranquilo y plácido cuando se examina por cualquier método que no sea de precisión microscópica. Sin embargo, el principio de incertidumbre pone de manifiesto que el promedio macroscópico deja en la oscuridad una gran cantidad de actividad microscópica.[33] Como veremos en breve; este frenesí es *el* obstáculo para poder fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica.

Teoría de campos cuántica

A lo largo de las décadas de 1930 y 1940, los físicos teóricos, siguiendo las preferencias de Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga y Feynman, por nombrar a unos pocos, lucharon sin descanso por hallar un formalismo matemático capaz de manejar este jaleo microscópico. Descubrieron que la ecuación de onda cuántica de Schrödinger (mencionada en el capítulo 4) era en realidad tan sólo una descripción aproximada de la física microscópica, una aproximación que funciona extraordinariamente bien cuando no intentamos aplicarla demasiado profundamente en el frenesí microscópico (tanto de manera experimental, como teórica), pero que desde luego falla si lo intentamos.

El elemento central de la física que Schrödinger ignoró en su formulación de la mecánica cuántica es la relatividad especial. De hecho, Schrödinger *intentó* inicialmente incorporar la relatividad especial, pero la ecuación cuántica a la que esto le condujo realizaba predicciones que demostraron estar reñidas con ciertas mediciones experimentales aplicadas al hidrógeno. Esto le sugirió a Schrödinger la idea, que el tiempo ha convertido en una tradición dentro de la física, de adoptar el lema «divide y vencerás»: en vez de intentar, de un salto, incorporar todo lo que

conocemos sobre el universo físico para desarrollar una nueva teoría, a menudo es mucho más beneficioso dar gran cantidad de pequeños pasos que incluyen secuencialmente los descubrimientos más recientes de la investigación de vanguardia. Schrödinger buscó y halló un marco matemático que abarcaba la dualidad onda-partícula descubierta experimentalmente, pero no incorporó, en aquella primera etapa de estudio, la relatividad especial.[34]

Pero los físicos pronto se dieron cuenta de que la relatividad especial era un requisito fundamental para conseguir un marco adecuado dentro de la mecánica cuántica. Esto se debe a que el frenesí microscópico exige el reconocimiento por nuestra parte de que la energía se puede manifestar de una enorme cantidad de maneras —una noción que procede de la relatividad especial, concretamente de la fórmula $E = mc^2$—. Al ignorar la relatividad especial, el planteamiento de Schrödinger ignoraba la maleabilidad de la materia, la energía y el movimiento.

Los físicos, en sus esfuerzos iniciales por abrir camino para fusionar la relatividad especial con los conceptos cuánticos, se centraban en la fuerza electromagnética y sus interacciones con la materia. A través de una serie de planteamientos muy inspirados crearon la *electrodinámica cuántica*. Es un ejemplo de lo que ha llegado a llamarse *teoría cuántica relativista de campos*, o abreviadamente *teoría de campos cuántica*. Es una teoría cuántica porque todas las cuestiones probabilísticas y de incertidumbre están incorporadas desde el principio; es una teoría de campos porque fusiona los principios cuánticos con las nociones clásicas previas de un campo de fuerzas —en este caso, el campo electromagnético de Maxwell—. Finalmente, es relativista porque la relatividad especial está también incorporada desde el principio. (Si desea tener una metáfora visual de un campo cuántico, puede evocar la imagen de un campo clásico —es decir, como un océano de líneas de campo invisibles que invaden el espacio— pero hay que refinar esta imagen de dos maneras. Primero, hay que imaginarse un campo cuántico como algo formado por unos ingredientes que son partículas, tales como lo son los fotones para el campo electromagnético. En segundo lugar, debería imaginarse la energía, en forma de masas de partículas con su movimiento, desplazándose hacia atrás y hacia delante sin cesar, desde un campo cuántico a otro mientras vibran continuamente a través del espacio y el tiempo).

Se puede decir que la electrodinámica cuántica es la teoría más precisa que jamás se ha desarrollado sobre los fenómenos naturales. Una ilustración de esta precisión se puede hallar en la obra de Toichiro Kinoshita, un experto en física de partículas de la Universidad de Cornell, que durante los últimos treinta años ha utilizado esmeradamente la electrodinámica cuántica para calcular ciertas propiedades específicas de los electrones. Los cálculos de Kinoshita llenan miles de páginas y en última instancia han requerido el uso de los ordenadores más potentes del mundo para efectuarse completamente. Pero el esfuerzo ha valido la pena ampliamente, estos

cálculos producen unas predicciones relativas a los electrones que se han verificado experimentalmente con una exactitud de una milmillonésima. Esto constituye una coincidencia absolutamente asombrosa entre el cálculo teórico abstracto y el mundo real. A través de la electrodinámica cuántica, los físicos han podido consolidar el papel de los fotones como «los paquetes de luz más pequeños que pueden existir» y han logrado también poner de manifiesto sus interacciones con partículas cargadas eléctricamente tales como los electrones, dentro de un marco matemáticamente completo, convincente y capaz de realizar predicciones.

El éxito de la electrodinámica cuántica animó a otros físicos durante las décadas de 1960 y 1970 a intentar un planteamiento análogo para desarrollar dentro de la mecánica cuántica un modo de entender las fuerzas nuclear débil, nuclear fuerte y gravitatoria. Por lo que respecta a las fuerzas nuclear débil y nuclear fuerte, esta línea de ataque resultó ser inmensamente fructífera. En una analogía con la electrodinámica cuántica, los físicos consiguieron construir teorías cuánticas de campos para las fuerzas nuclear débil y nuclear fuerte, llamando a estas teorías *cromodinámica cuántica* y *teoría cuántica electrodébil*. La «cromodinámica cuántica» es un nombre sin significado profundo, aunque más llamativo que «dinámica cuántica de la interacción nuclear fuerte»; que sin embargo resultaría más lógico; por otra parte, el término «electrodébil» resume un importante logro en el camino de comprender las fuerzas de la naturaleza.

En el trabajo por el que se les concedió el premio Nobel, Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg demostraron que las fuerzas nuclear débil y electromagnética están *unidas* de forma natural por la descripción teórica cuántica de sus campos, aunque sus manifestaciones sean en apariencia completamente distintas en nuestro entorno inmediato. Después de todo, los campos de la fuerza nuclear débil disminuyen hasta tener una intensidad casi nula en todas las escalas, excepto en las de distancias subatómicas mientras que los campos electromagnéticos —la luz visible, las señales de radio y televisión, los rayos X— tienen una presencia macroscópica indiscutible. No obstante, Glashow, Salam y Weinberg demostraron, en esencia, que a una energías y temperaturas lo suficientemente altas —como sucedió una fracción de segundo después del *big bang*— los campos de las fuerzas nuclear débil y electromagnética *se disuelven* los unos en los otros, adoptan características indistinguibles, y su nombre más preciso es el de campos *electrodébiles*. Cuando la temperatura desciende, como ha estado sucediendo continuamente desde el *big bang*, las fuerza electromagnética y nuclear débil *cristalizan* en un modo diferente de la forma común que adoptan a altas temperaturas —a través de un proceso conocido como *ruptura de la simetría*, que describiremos más adelante— y por consiguiente parecen ser distintas en el frío universo en que actualmente habitamos.

Por lo tanto, si está llevando la cuenta, para la década de 1970 los físicos ya

habían desarrollado en el marco de la mecánica cuántica una descripción coherente y muy bien aceptada de tres de las cuatro fuerzas (la nuclear fuerte, la nuclear débil y la electromagnética) y habían demostrado que dos de ellas (la nuclear débil y la electromagnética) comparten en realidad un origen común (la fuerza electrodébil). Durante las dos últimas décadas, los físicos han sometido este tratamiento en el marco de la mecánica cuántica de las tres fuerzas no gravitatorias —con respecto a las interacciones mutuas y con las partículas de materia que presentamos en el capítulo 1— a una enorme cantidad de pruebas experimentales. La teoría ha satisfecho con aplomo todos estos desafíos. Una vez que los físicos experimentales han medido alrededor de 19 parámetros (las masas de las partículas que figuran en la Tabla 1.1, sus cargas de fuerza que se reflejan en la tabla que aparece en la nota final número 1 relativa al capítulo 1, las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias que aparecen en la Tabla 1.2, así como algunos otros parámetros que no necesitamos mencionar aquí), y los teóricos han incluido estos números en las teorías cuánticas de campos relativas a las partículas de materia y a las fuerzas nuclear débil, nuclear fuerte y electromagnética, las predicciones subsiguientes de la teoría que se refiere al microcosmos concuerdan espectacularmente con los resultados experimentales. Esto es aplicable en todo orden, incluso llegando a energías capaces de pulverizar la materia en fragmentos tan pequeños como una trillonésima de metro, que es el límite tecnológico actual. Por esta razón, los físicos se refieren a la teoría de las tres fuerzas no gravitatorias y las tres familias de partículas de materia denominándola teoría estándar, o (más frecuentemente) *modelo estándar* de la física de partículas.

Partículas mensajeras

Según el modelo estándar, al igual que el fotón es el constituyente mínimo de un campo electromagnético, los campos de las fuerzas nuclear fuerte y nuclear débil poseen también constituyentes mínimos. Como ya mencionamos brevemente en el capítulo 1, los paquetes mínimos de la fuerza nuclear fuerte se llaman *gluones*, y los de la fuerza nuclear débil reciben el nombre de *bosones gauge débiles* (o, más concretamente, los bosones W y Z). El modelo estándar nos orienta a pensar que estas partículas de fuerza no tienen estructura interna; en este marco son, en todos los sentidos, tan elementales como las partículas de las tres familias de partículas materiales.

Los fotones, los gluones y los bosones gauge débiles, proporcionan el mecanismo microscópico necesario para transmitir las fuerzas de las cuales son constituyentes.

Por ejemplo, cuando una partícula cargada eléctricamente repele a otra de la misma carga eléctrica, se puede pensar más o menos que cada partícula está rodeada por un campo eléctrico —una «nube» o «niebla» de «esencia eléctrica»— y la fuerza que cada partícula experimenta surge de la repulsión entre sus respectivos campos de fuerza. Sin embargo, la descripción microscópica más precisa del modo en que se repelen una a otra es algo diferente. Un campo electromagnético está formado por un enjambre de fotones; la interacción entre dos partículas cargadas surge en realidad del hecho de que dichas partículas se «disparan» fotones entre ellas mismas, lanzándolos y devolviéndolos. En una analogía aproximada al modo en que puede usted perturbar el movimiento de alguien que patina sobre hielo con usted, y el de usted mismo, lanzándole una andanada de bolas de bowling, también dos partículas cargadas eléctricamente ejercen influencia la una en la otra intercambiando esos pequeños paquetes de luz.

Un fallo importante de la analogía del patinaje sobre hielo es que el intercambio de bolas siempre es «de repulsión»: aleja a los patinadores uno del otro. Por el contrario, dos partículas dotadas de cargas opuestas interaccionan también a través del intercambio de fotones, aunque la fuerza electromagnética resultante es una fuerza de atracción. Es como si el fotón no fuera en sí mismo el transmisor de la fuerza, sino más bien el transmisor de un *mensaje* que dice cómo debe responder el receptor a la fuerza en cuestión. En el caso de las partículas que tienen cargas iguales, el fotón es portador de un mensaje que dice «Apártate», mientras que, si las partículas tienen cargas opuestas, lleva el mensaje que dice «Acércate». Por esta razón, el fotón se denomina a veces *partícula mensajera* de la fuerza electromagnética. De un modo similar, los gluones y los bosones gauge débiles son las partículas mensajeras de las fuerzas nucleares fuerte y débil, respectivamente. La fuerza nuclear fuerte, que mantiene a los quarks unidos dentro de los protones y los neutrones, surge de quarks que intercambian gluones. Los gluones, (del inglés «glue» que significa cola o engrudo) proporcionan el «pegamento» que mantiene a las partículas sub-atómicas unidas. La fuerza nuclear débil, que es responsable de ciertos tipos de transmutaciones de partículas en la desintegración radiactiva, tiene como mediadores a los bosones gauge débiles.

Simetría Gauge

Ya habrá notado el lector que la fuerza de la gravedad es la excepción en nuestra discusión sobre la teoría cuántica de las fuerzas de la naturaleza. Dado el éxito del

planteamiento que han utilizado los físicos para las otras tres fuerzas, se podría sugerir a los físicos que buscaran una teoría cuántica de campos aplicable a la fuerza gravitatoria —una teoría en la cual el paquete mínimo del campo de la fuerza gravitatoria, el *gravitón*, sería la partícula mensajera correspondiente al campo gravitatorio—. A primera vista, tal como la percibimos ahora, esta sugerencia parecería ser especialmente adecuada porque la teoría cuántica de campos, aplicada a las tres fuerzas no gravitatorias, pone de manifiesto que existe una similitud sumamente seductora entre dichas fuerzas y un aspecto de la fuerza gravitatoria que tratábamos en el capítulo 3.

Recuérdese que la fuerza gravitatoria nos permite afirmar que todos los observadores —independientemente de su estado de movimiento— están en pie de igualdad absoluta. Incluso aquellos de los que pensaríamos normalmente que experimentan una aceleración pueden proclamar que se encuentran en reposo, ya que pueden atribuir la fuerza que experimentan al hecho de estar inmersos en un campo gravitatorio. En este sentido, la gravedad refuerza la simetría: garantiza que todos los puntos de vista de los observadores, todos los marcos de referencia posibles, tienen igual validez. La similitud con las fuerzas nuclear fuerte, nuclear débil y electromagnética es que éstas también están todas ellas conectadas necesariamente con simetrías, aunque éstas sean significativamente más abstractas que la simetría asociada a la gravedad.

Para hacemos una idea aproximada de estos principios de simetría más bien sutiles, veamos un ejemplo importante. Como hemos indicado en la tabla de la nota final 1 del capítulo 1, cada quark se presenta en tres «colores» (llamados fantasiosamente rojo, verde y azul, aunque se trata de meras etiquetas que no tienen relación con el color en el sentido visual corriente), que determinan cómo responde ese quark a la fuerza nuclear fuerte, casi del mismo modo que su carga eléctrica determina cómo responde a la fuerza electromagnética. Todos los datos que se han recogido establecen que existe una simetría entre los quarks en el sentido de que las interacciones entre dos quarks del mismo color (rojo con rojo, verde con verde, o azul con azul) son todas idénticas y, de un modo similar, las interacciones entre dos quarks de diferente color (rojo con verde, verde con azul, o azul con rojo) son también idénticas. De hecho, los datos apoyan algo aún más impactante. Si los tres colores —las tres cargas fuertes diferentes— que un quark puede llevar se cambiasen todos ellos de una manera determinada (hablando simbólicamente, en nuestro lenguaje cromático imaginario, si el rojo, el verde y el azul se cambiasen a amarillo, índigo y violeta) e incluso si los detalles de este cambio variaran de un momento a otro, o de un lugar a otro; las interacciones entre los quarks permanecerían, una vez más, absolutamente invariables. Por esta razón, del mismo modo que decimos que una esfera constituye un ejemplo de simetría rotatoria porque tiene el mismo aspecto

independientemente de cómo la hagamos rotar en nuestras manos o de cómo cambiemos el ángulo desde el que la vemos, también podemos decir que el universo constituye un ejemplo de *simetría de la fuerza nuclear fuerte*: la física permanece invariable —es completamente indiferente— ante estos cambios de carga y fuerza. Por razones históricas, los físicos dicen también que la simetría de la fuerza nuclear fuerte es un ejemplo de *simetría gauge*.[35]

Ésta es la cuestión esencial. Al igual que, en la relatividad general, la simetría entre todos los posibles puntos ventajosos de observación requiere la existencia de la fuerza gravitatoria, los trabajos basados en la obra desarrollada por Hermann Weyl en la década de *1920* y por Chen-Ning Yang y Robert Mills en la década de *1950* demostraron que las simetrías gauge requieren la existencia de otras fuerzas. De un modo muy parecido a un sistema sensible de control medioambiental que, en una zona determinada, mantiene la temperatura, la presión atmosférica y la humedad totalmente constantes, compensando perfectamente cualquier influencia exterior, ciertos tipos de campos de fuerzas, según Yang y Mills, proporcionarán una compensación perfecta de los cambios en las cargas de fuerza, manteniendo así completamente invariables las interacciones físicas entre partículas. En el caso de la simetría gauge asociada a las cargas cambiantes según el color de los quarks, la fuerza requerida no es otra que la propia fuerza nuclear fuerte. Es decir, sin la fuerza nuclear fuerte, la física cambiaría según los tipos de cambios de las cargas correspondientes a los diferentes colores mencionadas anteriormente. Esta constatación muestra que, aunque la fuerza gravitatoria y la fuerza nuclear fuerte tienen propiedades muy diferentes (recordemos, por ejemplo, que la gravedad es mucho más débil que la fuerza nuclear fuerte y actúa a distancias enormemente mayores), poseen un cierto patrimonio similar: cada una de ellas es necesaria para que el universo abarque simetrías especiales. Además, una discusión similar se podría aplicar a las fuerzas nuclear débil y electromagnética, demostrando que también su existencia está ligada a otras simetrías gauge. Por consiguiente, las cuatro fuerzas están asociadas directamente con principios de simetría.

Esta característica común de las cuatro fuerzas parecería ser de buen agüero para la sugerencia planteada al principio de esta sección. A saber, en nuestro esfuerzo por incorporar la mecánica cuántica a la relatividad general tendríamos que buscar una teoría cuántica de campos para la fuerza gravitatoria, de un modo parecido a lo que han hecho los físicos descubriendo unas teorías cuánticas de campos muy acertadas para las otras tres fuerzas. A lo largo de los años, este razonamiento ha inspirado a un prodigioso y distinguido grupo de físicos la idea de seguir este camino animosamente, pero el terreno ha resultado estar sembrado de peligros y ninguno ha logrado recorrerlo completamente. Veamos por qué.

Relatividad General vs. Mecánica Cuántica

El ámbito habitual en el que es aplicable la relatividad general se encuentra a escala de las grandes distancias astronómicas. Con tales distancias, según la teoría de Einstein, la ausencia de masa significa que el espacio es plano, como se reflejaba en la Figura 3.3. Si queremos unificar la relatividad general y la mecánica cuántica, debemos cambiar radicalmente nuestro enfoque y examinar las propiedades *microscópicas* del espacio. Esto se ilustra en la Figura 5.1, enfocando en primer plano y ampliando secuencialmente unas regiones cada vez más pequeñas de la estructura espacial.

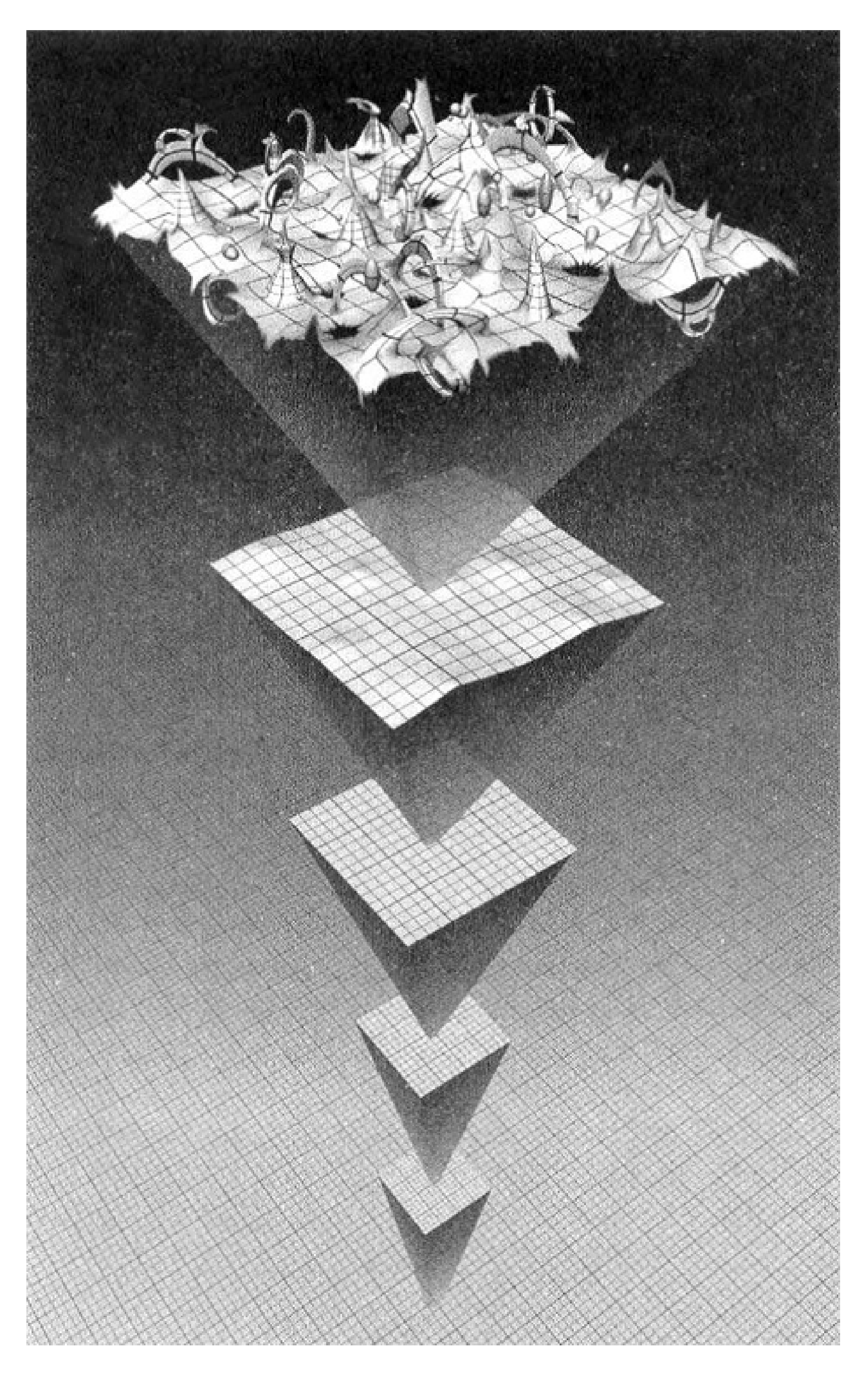


Figura 5.1 Ampliando secuencialmente una región del espacio, se pueden comprobar sus propiedades ultramicroscópicas. Los intentos de fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica chocan con la violenta espuma cuántica que surge al nivel máximo de ampliación.

Al principio, cuando enfocamos estas regiones en primer plano, no sucede gran cosa; como vemos en los tres primeros niveles de ampliación en la Figura 5.1, la estructura del espacio mantiene la misma forma básica. Razonando desde un punto de vista puramente clásico, sería de esperar que esta imagen plácida y lisa del espacio se mantuviera siempre mientras vamos hacia escalas de longitud arbitrariamente pequeñas. Pero la mecánica cuántica cambia esta conclusión radicalmente. *Todo* está sometido a las fluctuaciones cuánticas inherentes al principio de incertidumbre incluso el campo gravitatorio—. Aunque el razonamiento clásico implica que el espacio vacío tiene un campo gravitatorio cero, la mecánica cuántica demuestra que es cero como promedio, pero que su valor real describe ondulaciones hacia arriba y hacia abajo debido a las fluctuaciones cuánticas. Además, el principio de incertidumbre nos dice que el tamaño de las ondulaciones del campo gravitatorio crece a medida que centramos nuestra atención en regiones del espacio más pequeñas. La mecánica cuántica demuestra que nada tiende a quedar arrinconado; el estrechamiento del enfoque espacial nos lleva a ondulaciones cada vez mayores.

Dado que los campos gravitatorios se caracterizan por su grado de curvatura, estas fluctuaciones cuánticas se manifiestan como distorsiones cada vez más violentas del espacio que los rodea. Vemos cómo emergen indicios de estas distorsiones en el cuarto nivel de ampliación en la Figura 5.1. Haciendo la prueba con escalas de distancias aún menores, como en el quinto nivel de la Figura 5.1, vemos que las ondulaciones aleatorias previstas por la mecánica cuántica en el campo gravitatorio se traducen en unos alabeos del espacio tan fuertes que éste deja de parecerse a un objeto geométrico ligeramente curvado, como en la analogía de la membrana de goma utilizada en la discusión que tuvo lugar en el capítulo 3. Al contrario, adopta la forma espumeante, turbulenta y retorcida que se observa en la parte superior de la figura. John Wheeler acuñó la expresión *espuma cuántica* para describir el frenesí que pone de manifiesto este examen ultramicroscópico del espacio (y el tiempo); describe un escenario del universo nada habitual en el que las nociones convencionales de izquierda y derecha, atrás y adelante, arriba y abajo (e incluso la de antes y después) pierden su significado. Es precisamente en estas escalas pequeñas donde nos encontramos con la incompatibilidad fundamental entre la relatividad general y la mecánica cuántica. *La noción de una geometría espacial lisa, que constituye el principio fundamental de la relatividad general, queda destruida por la violentas fluctuaciones del mundo cuántico a escalas de distancias pequeñas*. A escalas ultramicroscópicas, la característica principal de la mecánica cuántica —el principio de incertidumbre— está en conflicto directo con la característica

fundamental de la relatividad general —el modelo geométrico liso del espacio— (y del espacio-tiempo).

En la práctica, este conflicto surge de una manera muy concreta. Los cálculos que unifican las ecuaciones de la relatividad general y las de la mecánica cuántica dan lugar siempre a la misma respuesta ridícula: el infinito. Como un golpe repentino en la muñeca, dado por un maestro de escuela de los viejos tiempos, una respuesta infinita es el modo que tiene la naturaleza para decirnos que estamos haciendo algo bastante erróneo.[36] Las ecuaciones de la relatividad general no pueden manejar el irritante frenesí de la espuma cuántica.

Sin embargo, obsérvese que, a medida que retrocedemos a distancias más ordinarias (siguiendo a la inversa la secuencia de los dibujos de la Figura 5.1), las ondulaciones aleatorias y violentas que se producen a pequeña escala se anulan mutuamente —de una forma muy parecida a lo que sucede cuando, por término medio, la cuenta bancaria de nuestro compulsivo prestatario no muestra ninguna evidencia de su compulsión— y para la estructura del universo vuelve a ser exacto el concepto de una forma geométrica lisa. Es como lo que se experimenta al mirar una imagen matricial de puntos: de lejos, los puntos que componen la imagen se fusionan y crean la impresión de una imagen homogénea cuya luminosidad aparentemente varía con suavidad de una zona a otra. Sin embargo, cuando se examina la imagen a escalas de distancia cada vez menores, se observa que difiere notablemente de ese aspecto homogéneo que presenta cuando se ve a grandes distancias. No es más que un conjunto de puntos discretos que están bastante separados entre sí. Pero, tengamos en cuenta que sólo se es consciente de la naturaleza discreta de la imagen cuando se examina a escalas mínimas; de lejos parece homogénea. De manera similar, la estructura del espacio-tiempo se presenta lisa, salvo cuando se examina con precisión ultramicroscópica. Ésta es la razón por la cual la relatividad general funciona bien a distancias (y tiempos) suficientemente grandes —las escalas que corresponden a muchas aplicaciones astronómicas típicas— pero se vuelve incoherente a distancias y tiempos cortos. El dogma fundamental de una geometría para superficies lisas y ligeramente curvadas se justifica a grandes escalas, pero se derrumba debido a las fluctuaciones cuánticas cuando se lleva a pequeñas escalas.

Los principios básicos de la relatividad general y de la mecánica cuántica nos permiten calcular las escalas de distancia aproximadas bajo las cuales habría que entrar para que resultaran perceptibles los perniciosos fenómenos de la Figura 5.1. El pequeño valor de la constante de Planck —que rige la fuerza de los efectos cuánticos — y la debilidad intrínseca de la fuerza gravitatoria se unen para producir un resultado llamado la *longitud de Planck*, que es tan pequeña que casi no puede imaginarse: la milésima de una millonésima de una billonésima de una billonésima de centímetro (10^{-33} centímetros).[37] Así, el quinto nivel en la Figura 5.1 representa

esquemáticamente el paisaje del universo a una escala de longitud ultramicroscópica, inferior a la de Planck. Para hacernos una idea de esta escala, si ampliáramos un átomo al tamaño del universo conocido, la longitud de Planck se expandiría solamente hasta la altura de un árbol promedio.

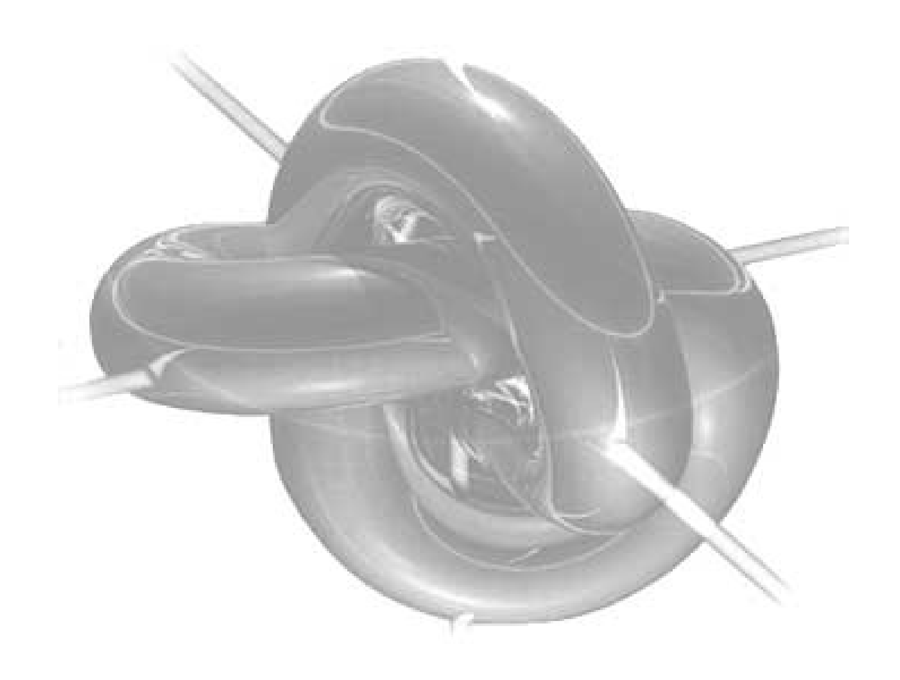
De esta forma, vemos que la incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica se manifiesta sólo en un dominio bastante esotérico del universo. Por esta razón, sería razonable que nos preguntáramos si vale la pena preocuparse por ello. De hecho, los físicos no hablan con una voz única cuando se refieren a esta cuestión. Hay físicos que son conscientes de este problema, pero se las arreglan felizmente, cuando sus investigaciones lo requieren, utilizando la mecánica cuántica y la relatividad general para resolver cuestiones en las que se manejan habitualmente longitudes muy superiores a la longitud de Planck. Hay otros físicos, sin embargo, que están profundamente consternados por el hecho de que los dos pilares fundamentales de la física, hasta donde sabemos, son en lo básico fundamentalmente incompatibles, con independencia de que sea a distancias ultramicroscópicas donde se detecte el problema. Según argumentan éstos, dicha incompatibilidad indica la existencia de un fallo esencial en nuestro modo de comprender el universo físico. Esta opinión se basa en un punto de vista no demostrable, pero profundamente sentido, según el cual el universo, si se considera a su nivel más profundo y elemental, ha de poder describirse mediante una teoría lógicamente coherente cuyas partes encajen en total armonía. Seguramente, aparte de la importancia que pueda tener esta incompatibilidad para sus propias investigaciones, a la mayoría de los físicos les resulta difícil creer que, en el fondo, nuestra explicación teórica más profunda sobre el universo sea un remiendo matemáticamente inconsistente de dos marcos explicativos poderosos, pero contradictorios.

Los físicos han llevado a cabo numerosos intentos de modificar de algún modo la relatividad general o la mecánica cuántica para evitar este conflicto, pero estos intentos, aunque a menudo han sido intrépidos e ingeniosos, han desembocado en un fracaso tras otro.

Así ha sido, hasta el descubrimiento de la teoría de las supercuerdas.[38]

Parte III

La Sinfonía Cósmica



Capítulo 6

Sólo música: Los fundamentos de la teoría de supercuerdas

Desde hace mucho tiempo, la música ha proporcionado las metáforas elegidas para referirse a los problemas relativos al cosmos que han dado más quebraderos de cabeza. Desde la antigua expresión pitagórica «música de las esferas», hasta las «armonías de la naturaleza» que han guiado la investigación a través de los tiempos, nos hemos dedicado colectivamente a buscar la canción que canta la naturaleza en el tranquilo deambular de los cuerpos celestes y en el alboroto de las detonaciones de las partículas subatómicas. Con el descubrimiento de la teoría de las supercuerdas, las metáforas musicales adoptan un realismo sorprendente, ya que esta teoría sugiere que el paisaje microscópico está cubierto por diminutas cuerdas cuyos modelos de vibración orquestan la evolución del cosmos. Los vientos del cambio, según la teoría de las supercuerdas, soplan en ráfagas a través de un universo eólico.

Esto contrasta con el modelo estándar, que considera a los constituyentes elementales del universo como ingredientes similares a puntos, sin estructura interna. A pesar de lo poderoso que es este planteamiento (como ya hemos mencionado, todas las predicciones relativas al mundo microscópico realizadas mediante el modelo estándar se han verificado esencialmente hasta escalas de una trillonésima de metro, el límite tecnológico actual), el modelo estándar no debe considerarse como una teoría completa o definitiva, porque no incluye la gravedad. Además, han fallado los intentos de incorporar la gravedad al marco de la mecánica cuántica debido a las violentas fluctuaciones que aparecen en la estructura espacial a escalas ultramicroscópicas, es decir, cuando se consideran distancias menores que la longitud de Planck. Este conflicto no resuelto ha fomentado la búsqueda de un conocimiento aún más profundo de la naturaleza. En 1984, los físicos Michael Green, entonces en el *Queen Mary College*, y John Schwarz, del *California Institute of Technology*, proporcionaron la primera prueba convincente de que la *teoría de las supercuerdas* (o teoría de cuerdas, para abreviar) podría aportar este conocimiento.

La teoría de cuerdas ofrece una nueva y profunda modificación de nuestra

descripción teórica de las propiedades ultramicroscópicas del universo —una modificación que, como fueron constatando los físicos lentamente, altera la relatividad general de Einstein justo de la manera precisa para hacerla totalmente compatible con las leyes de la mecánica cuántica—. Según la teoría de cuerdas, los componentes elementales del universo *no son* partículas puntuales, sino diminutos filamentos unidimensionales, algo así como tiras de goma infinitamente delgadas, que vibran de un lado para otro. Pero hay que evitar que este nombre nos pueda inducir a engaño: a diferencia de un trozo ordinario de cuerda, que está compuesto de moléculas y átomos, se supone que las cuerdas de la teoría de cuerdas están en una ubicación profunda en lo más interno de la materia. La teoría plantea que *son* unos componentes microscópicos que constituyen las partículas de las que están formados los propios átomos. Las cuerdas de la teoría de cuerdas son tan pequeñas —su longitud media es aproximadamente la longitud de Planck— que *parecen* puntos incluso cuando son examinadas con los instrumentos más potentes.

La simple sustitución de las partículas puntuales por ramales de cuerda como componentes fundamentales de cualquier cosa tiene unas consecuencias de largo alcance. En primer lugar y ante todo, la teoría de cuerdas parece resolver el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Como veremos más adelante, la naturaleza espacialmente alargada de una cuerda es el nuevo elemento crucial que permite crear un marco armonioso único que incorpora ambas teorías. En segundo lugar, la teoría de cuerdas proporciona una teoría auténticamente unificada, ya que se propone que toda la materia y todas las fuerzas surgen a partir de un componente básico: las cuerdas oscilantes. Finalmente, como se explicará, de una manera más completa, en capítulos posteriores, además de estos logros notables, la teoría de cuerdas, una vez más, cambia radicalmente nuestra manera de entender el espacio-tiempo.[39]

Una breve historia de la teoría de cuerdas

En 1968, un joven físico teórico llamado Gabriele Veneciano se esforzaba por encontrar un sentido lógico para varias propiedades de la fuerza nuclear fuerte observadas experimentalmente. Veneziano, que entonces era un investigador del CERN, el laboratorio europeo de aceleración de partículas de Ginebra, Suiza, había trabajado durante varios años en distintos aspectos de este problema, hasta que un día tuvo una revelación impactante. Para su sorpresa, se dio cuenta de que una esotérica fórmula inventada dos siglos antes con fines meramente matemáticos por el

renombrado matemático suizo Leonhard Euler —la llamada función beta de Euler— parecía ajustarse de un golpe a la descripción de numerosas propiedades de partículas que interaccionan fuertemente entre sí. La observación de Veneciano proporcionó una poderosa envoltura matemática para muchas características de la fuerza nuclear fuerte y puso en marcha un intenso frenesí de investigaciones encaminadas hacia la utilización de la función beta de Euler, y diversas generalizaciones de ésta, para describir la enorme cantidad de datos que se estaban recogiendo en varios colisionadores de partículas atómicas repartidos por todo el mundo. Sin embargo, la observación de Veneziano era en un sentido incompleta. Como una fórmula memorizada usada por un estudiante sin entender su significado o su justificación, la función beta de Euler parecía funcionar, pero nadie sabía por qué. Era una fórmula en busca de su explicación. Esto cambió en 1970 cuando los trabajos de Yoichiro Nambu, de la Universidad de Chicago, Holger Nielsen, del *Niels Bohr Institute*, y Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, revelaron los principios físicos, hasta entonces desconocidos, que se ocultaban detrás de la fórmula de Euler. Estos físicos demostraron que, si se construía un modelo de partículas elementales considerándolas como pequeñas cuerdas vibradoras unidimensionales, sus interacciones nucleares se podían describir con toda exactitud mediante la función de Euler. Según su razonamiento, si los trozos de cuerda eran suficientemente pequeños, podrían seguir pareciendo partículas puntuales y, por consiguiente, podrían ser coherentes con las observaciones experimentales.

Aunque esto proporcionaba una teoría intuitivamente sencilla y satisfactoria, no tardó mucho tiempo en llegar la demostración de que la descripción de la fuerza nuclear fuerte mediante cuerdas fallaba. A principios de la década de 1970, unos experimentos con altas energías capaces de comprobar el mundo subatómico más a fondo demostraron que el modelo de cuerdas realizaba cierto número de predicciones en contradicción directa con las observaciones. Al mismo tiempo, se estaba desarrollando la teoría cuántica de campos aplicada a las partículas puntuales, en el marco de la cromodinámica cuántica, y su abrumador éxito en la descripción de la fuerza nuclear fuerte hizo que se llegara al abandono de la teoría de cuerdas.

La mayoría de los físicos de partículas pensó que la teoría de cuerdas había quedado relegada al cubo de basura de la ciencia, pero unos pocos investigadores se mantuvieron fieles a ella. Schwarz, por ejemplo, pensó que «la estructura matemática de la teoría de cuerdas era tan bella y tenía tantas propiedades milagrosas que tenía que apuntar hacia algo profundo».[40] Uno de los problemas que los físicos detectaron en la teoría de cuerdas era que parecía tener una auténtica profusión de riquezas desconcertantes. Esta teoría contenía configuraciones de cuerdas vibrantes que presentaban propiedades afines a las de los gluones, lo cual daba sentido a la afirmación previa de que se trataba de una teoría de la fuerza nuclear fuerte. Pero,

además de esto, contenía partículas *adicionales* que actuaban como mensajeras y no parecían tener ninguna importancia en las observaciones experimentales de la fuerza nuclear fuerte. En 1974, Schwarz y Joel Scherk, de la *Ecole Normale Supérieure*, dieron un intrépido salto adelante que transformó este vicio aparente en una virtud. Después de estudiar el rompecabezas de patrones de vibración de cuerdas cuasi mensajeras, constataron que sus propiedades encajaban perfectamente con las de la hipotética partícula mensajera de la fuerza gravitatoria: el gravitón. Aunque estos «paquetes mínimos» de la fuerza gravitatoria nunca han sido vistos, hasta ahora, los teóricos pueden predecir, con toda confianza, ciertas características básicas que deben poseer, y Scherk y Schwarz descubrieron que estas propiedades se hacían realidad de una manera exacta en ciertas configuraciones vibratorias. Basándose en esto, Scherk y Schwarz sugirieron que la teoría de cuerdas había fallado en aquel intento inicial porque los físicos habían reducido indebidamente su alcance. La teoría de cuerdas *no es* solamente una teoría de la fuerza nuclear fuerte, dijeron Scherk y Schwarz; es una teoría cuántica que también *incluye a la gravedad*[41]

La comunidad de los físicos no recibió esta sugerencia con un gran entusiasmo. De hecho, Schwarz dice «nuestra obra fue ignorada a nivel universal».[42] El camino del progreso ya estaba para entonces cubierto de numerosos intentos fallidos de unificar la gravedad y la mecánica cuántica. La teoría de cuerdas había demostrado estar equivocada en sus esfuerzos iniciales por describir la fuerza nuclear fuerte, y a muchos les parecía que no tenía sentido intentar utilizar esta teoría para perseguir un objetivo aún más amplio. Estudios posteriores llevados a cabo durante las décadas de 1970 y 1980 demostraron, de un modo todavía más desolador, que la teoría de cuerdas y la mecánica cuántica padecían sus propios conflictos sutiles. Resultó que, una vez más, la fuerza gravitatoria se resistía a incorporarse a la descripción microscópica del universo.

Así estuvieron las cosas hasta 1984. En una crucial publicación que culminaba más de doce años de intensa investigación largamente ignorada y a menudo rotundamente rechazada por la mayoría de los físicos, Green y Schwarz demostraron que el sutil conflicto cuántico que padecía la teoría de cuerdas se podía resolver. Además, también demostraron que la teoría resultante tenía suficiente envergadura para abarcar las cuatro fuerzas y todo tipo de materia. Cuando la noticia de este hallazgo se difundió entre los físicos a nivel mundial, cientos de físicos de partículas abandonaron sus proyectos de investigación para poner en marcha con todos sus recursos un asalto a lo que parecía ser el último campo de batalla teórico en la antigua búsqueda de un modo de comprender los mecanismos más profundos del universo.

Comencé la escuela graduada en la Universidad de Oxford en octubre de 1984. Aunque me hacía ilusión estar aprendiendo teoría cuántica de campos; teoría de mediciones (gauge) y relatividad general, existía entre los estudiantes graduados más

antiguos una sensación ampliamente difundida de que la física de partículas tenía poco o absolutamente ningún futuro. Estaba vigente el modelo estándar y su notable éxito en la predicción de resultados experimentales indicaba que su verificación definitiva era sólo cuestión de tiempo y de algunos detalles. Ir más allá de sus límites para incluir la gravedad y, posiblemente, *explicar* los datos experimentales en los que se basaba —los 19 números correspondientes a las masas de las partículas elementales, sus cargas de fuerza, y las intensidades relativas de las fuerzas, todos ellos números que se conocen a partir de los experimentos, pero que no se comprenden teóricamente— una tarea tan desalentadora que todos, salvo los físicos más intrépidos, se echaban atrás ante semejante desafío. Sin embargo, seis meses más tarde se produjo un vuelco total en el ambiente. El éxito de Green y Schwarz fue un chorro que llegó finalmente incluso hasta los estudiantes graduados de primer curso, y la apatía anterior fue barrida por una sensación electrizante de estar viviendo desde dentro un momento decisivo en la historia de la física. Como consecuencia, varios de nosotros empezamos a trabajar todas las horas del día y de la noche en un intento de llegar a dominar las amplias áreas de física teórica y matemáticas abstractas que eran requisito indispensable para comprender la teoría de cuerdas.

El período comprendido entre 1984 y 1986 se conoce como la «primera revolución de las supercuerdas». Durante estos tres años, físicos de todo el mundo escribieron más de mil publicaciones de investigación sobre la teoría de cuerdas. Estos trabajos demostraban de forma concluyente que numerosas características del modelo estándar —características que se habían descubierto durante décadas de esmerada investigación— *emergían naturalmente* y de una manera sencilla a partir de la grandiosa estructura de la teoría de cuerdas. Como dijo Michael Green: «En el momento en que uno se encuentra ante la teoría de cuerdas y constata que casi tocas los avances importantes de la física realizados durante los últimos cien años surgen —y surgen con tanta elegancia— de un punto de partida tan simple, se da uno cuenta de que esta teoría tan increíblemente imponente es algo que no tiene parangón».[43] Además, para muchas de estas características, como ya comentaremos más adelante, la teoría de cuerdas ofrece una explicación mucho más completa y satisfactoria que la que se puede hallar en el modelo estándar. Estos avances convencieron a muchos físicos de que la teoría de cuerdas estaba de lleno en camino de cumplir su promesa de ser la teoría unificada definitiva.

Sin embargo, una y otra vez, los expertos en teoría de cuerdas se encontraron con un escollo realmente importante. En la investigación física teórica, uno se encuentra a menudo confrontado con ecuaciones que son demasiado difíciles de entender o de analizar. Normalmente, los físicos no se rinden ante esta dificultad, sino que intentan resolver estas ecuaciones aproximadamente. La situación que se da en la teoría de cuerdas es aún más complicada. Tan sólo determinar cuáles son las *ecuaciones*

mismas ha resultado ser tan difícil que, hasta ahora, se han deducido únicamente versiones aproximadas de las mismas. Por este motivo, la teoría de cuerdas ha quedado limitada al cálculo de soluciones aproximadas para ecuaciones aproximadas. Después de los pocos años de avance acelerado durante la primera revolución de las supercuerdas, los físicos descubrieron que las aproximaciones que se estaban utilizando no eran adecuadas para responder a determinadas cuestiones fundamentales, lo cual entorpecía la consecución de posteriores avances. Sin propuestas concretas para ir más allá de los métodos aproximados, muchos físicos que trabajaban en la teoría de cuerdas acabaron frustrados y volvieron a sus líneas de investigación anterior. Para los que siguieron trabajando en la teoría de cuerdas, los últimos años de la década de 1980 y los primeros de la de 1990 fueron tiempos difíciles. Como un valioso tesoro encerrado en una caja fuerte y visible sólo a través de una diminuta, pero tentadora, mirilla, la belleza y las promesas de la teoría de cuerdas la hacían sumamente atractiva, pero nadie tenía la llave para liberar su poder. Largos intervalos de sequía quedaban periódicamente interrumpidos por importantes descubrimientos, pero todos los que trabajaban en este campo veían claro que se necesitaban nuevos métodos para poder ir más allá de las aproximaciones que se habían realizado hasta entonces.

Fue entonces cuando, durante el congreso sobre cuerdas «Strings 1995», en una emocionante conferencia pronunciada en la Universidad del Sur de California —una conferencia que asombró a una embelesada audiencia formada por los físicos más relevantes del mundo—, Edward Witten anunció un plan para dar el siguiente paso, poniendo así en marcha la «segunda revolución de las supercuerdas». Los expertos en teoría de cuerdas están trabajando arduamente para poner a punto una serie de métodos nuevos que prometen superar los obstáculos teóricos con los que se habían encontrado anteriormente. Las dificultades que entraña este camino pondrán a prueba seriamente el potencial técnico de los expertos en teoría de las supercuerdas que trabajan actualmente en el mundo, pero puede que finalmente se esté haciendo visible la luz al final del túnel, aunque todavía quede muy distante.

En este capítulo y en varios de los capítulos siguientes, explicaremos los conocimientos sobre teoría de cuerdas que surgieron durante la primera revolución de las supercuerdas, así como los trabajos posteriores realizados con anterioridad a la segunda revolución de las supercuerdas. De vez en cuando, mencionaremos nuevos descubrimientos surgidos durante esta segunda revolución; la explicación de estos avances más recientes llegará en los capítulos 12 y 13.

¿Los átomos griegos, otra vez?

Como ya hemos mencionado al principio de este capítulo y tal como se representa en la Figura 1.1, la teoría de cuerdas afirma que, si las supuestas partículas puntuales del modelo estándar se pudieran examinar con una precisión que está significativamente más allá de nuestra capacidad actual, se vería que cada una de ellas está formada por un único y diminuto bucle de cuerda que realiza oscilaciones.

Por razones que quedarán claras más adelante, la longitud de uno de estos bucles de cuerda normales es aproximadamente igual a la longitud de Planck, es decir, alrededor de cien trillones de veces (10^{20}) menor que el núcleo de un átomo. No es de extrañar que los experimentos actuales sean incapaces de resolver la naturaleza filamentosa microscópica de la materia: las cuerdas son diminutas incluso en relación con las escalas que se establecen para las partículas subatómicas. Necesitaríamos un acelerador que pudiera unir de golpe fragmentos de materia utilizando energías que serían algunos miles de billones de veces más potentes que las disponibles en cualquier acelerador construido hasta ahora, para poder poner de manifiesto directamente que una cuerda no es una partícula puntual.

Describiremos brevemente las asombrosas implicaciones que se producen como consecuencia de sustituir partículas puntuales por cuerdas, pero planteemos primero una cuestión más básica: ¿de qué están hechas las cuerdas?

Hay dos respuestas posibles a esta pregunta. En primer lugar, las cuerdas son verdaderamente fundamentales; son «átomos», es decir *componentes indivisibles*, en el sentido más auténtico de la palabra griega, tal como la utilizaran los antiguos griegos. Como componentes absolutamente mínimos de cualquier cosa, representan el final de la línea —la última de las muñecas rusas llamadas *matrioskas*— en las numerosas capas de subestructuras dentro del mundo microscópico. Desde este punto de vista, aunque las cuerdas tienen una extensión espacial, la cuestión de su composición no tiene ningún sentido. Si las cuerdas estuvieran hechas de algo menor que ellas mismas, no serían componentes fundamentales. En ese caso, aquello que formara las cuerdas las desplazaría inmediatamente y estaría en su derecho de ser considerado como un componente aún más básico del universo. Utilizando nuestra analogía lingüística, los párrafos están hechos de frases, las frases están hechas de palabras y las palabras están formadas por letras. ¿Qué cosa forma una letra? Desde un punto de vista lingüístico, éste es el final de la línea. Las letras son letras —son los bloques fundamentales que constituyen el lenguaje escrito; no hay ninguna subestructura más allá de ellas—. No tiene sentido cuestionarse su composición. De un modo similar, una cuerda es sencillamente una cuerda, puesto que no hay nada más fundamental, no se puede decir que esté compuesta por ninguna otra sustancia. Ésta es la primera respuesta. La segunda se basa en el simple hecho de que todavía no sabemos si la teoría de cuerdas es correcta, ni si es la teoría definitiva sobre la naturaleza. Si la teoría de cuerdas está realmente fuera de la realidad, entonces

podemos olvidar las cuerdas y la cuestión irrelevante acerca de su composición. Aunque esto es una posibilidad, la investigación que se está llevando a cabo desde mediados de la década de 1980 indica de manera abrumadora que es altamente improbable. Sin embargo, la historia nos ha enseñado, desde luego, que cada vez que profundizamos en el conocimiento del universo, encontramos componentes microscópicos aún más pequeños que constituyen un nivel todavía más profundo de la materia. Además, en caso de que la teoría de cuerdas no sea la teoría definitiva, otra posibilidad es que las cuerdas sean una capa más de la cebolla cósmica, una capa que se hace visible a la escala de la longitud de Planck, aunque no sea la última capa. En este caso, las cuerdas podrían estar formadas por estructuras aún más pequeñas. Los expertos en teoría de cuerdas han planteado y continúan investigando esta posibilidad. Hasta la fecha, en algunos estudios teóricos existen indicios intrigantes de que las cuerdas podrían tener otra subestructura, pero por ahora no hay ninguna prueba definitiva de esto. Sólo el tiempo y una intensa investigación dirán la última palabra con respecto a esta cuestión.

Aparte de unas pocas especulaciones que aparecen en los capítulos 12 y 15, a efectos de la discusión que aquí vamos a realizar, planteamos las cuerdas de la manera propuesta en la primera respuesta, es decir, consideraremos que las cuerdas son los componentes más fundamentales de la materia.

La unificación a través de la teoría de cuerdas

Además de su incapacidad para incorporar la fuerza de la gravedad, el modelo estándar tiene otro defecto: en él no hay explicación para los detalles de su construcción. ¿Por qué eligió la naturaleza la lista concreta de partículas y fuerzas que hemos esbozado en anteriores capítulos y hemos recogido en las Tablas 1.1 y 1.2? ¿Por qué los 19 parámetros con los que se describen cuantitativamente esos componentes tienen los valores que tienen? Es imposible evitar la idea de que sus números y sus propiedades parecen arbitrarios. ¿Existe un conocimiento más profundo oculto tras esos componentes aparentemente aleatorios, y se «eligieron» como resultado del azar esas propiedades físicas del universo?

El modelo estándar por sí mismo probablemente no puede ofrecer una explicación ya que acepta la lista de las partículas y sus propiedades como *datos* medidos experimentalmente. Del mismo modo que la información bursátil no puede utilizarse para determinar el estado de la cartera de valores de un inversor sin conocer los datos de la inversión inicial que éste ha realizado, el modelo estándar tampoco se puede

utilizar para realizar predicciones sin conocer los datos de las propiedades de las partículas fundamentales.[44] Después de que los físicos experimentales especializados en partículas llevan a cabo la fastidiosa tarea de medir estos datos, los teóricos pueden utilizar el modelo estándar para realizar predicciones comprobables, como, por ejemplo, qué sucederá cuando unas partículas determinadas se fusionen en un acelerador de partículas. Pero el modelo estándar no puede explicar las propiedades de las partículas fundamentales que figuran en las Tablas 1.1 y 1.2, lo mismo que el índice Down-Jones de hoy no puede explicar unas inversiones iniciales en bolsa realizadas hace diez años.

De hecho, si los experimentos hubieran revelado que el mundo microscópico contiene unas partículas algo diferentes, posiblemente en interacción mediante unas fuerzas de algún modo distintas, estos cambios se habrían incorporado fácilmente al modelo estándar, dotando a la teoría de unos parámetros diferentes. La estructura del modelo estándar es, en este sentido, demasiado flexible para poder explicar las propiedades de las partículas experimentales, ya que podría haber encajado toda una gama de posibilidades.

La teoría de cuerdas es radicalmente diferente. Se trata de un edificio teórico único e inflexible. Requiere que no se introduzca como dato más que un solo número, como se explica más adelante, y este número establece la escala de referencia para las mediciones. Todas las propiedades del mundo microscópico se encuentran dentro del dominio de su poder descriptivo. Para comprender esto, pensemos en unas cuerdas que nos resultan más familiares, como son las cuerdas de un violín. Cada una de estas cuerdas puede ejecutar una enorme variedad (de hecho, un número infinito) de patrones de vibración diferentes conocidos como *resonancias*, tales como las que se representan en la Figura 6.1. Se trata de los modelos de ondas cuyos picos y senos están espaciados uniformemente y encajan perfectamente entre los dos extremos fijos de la cuerda.

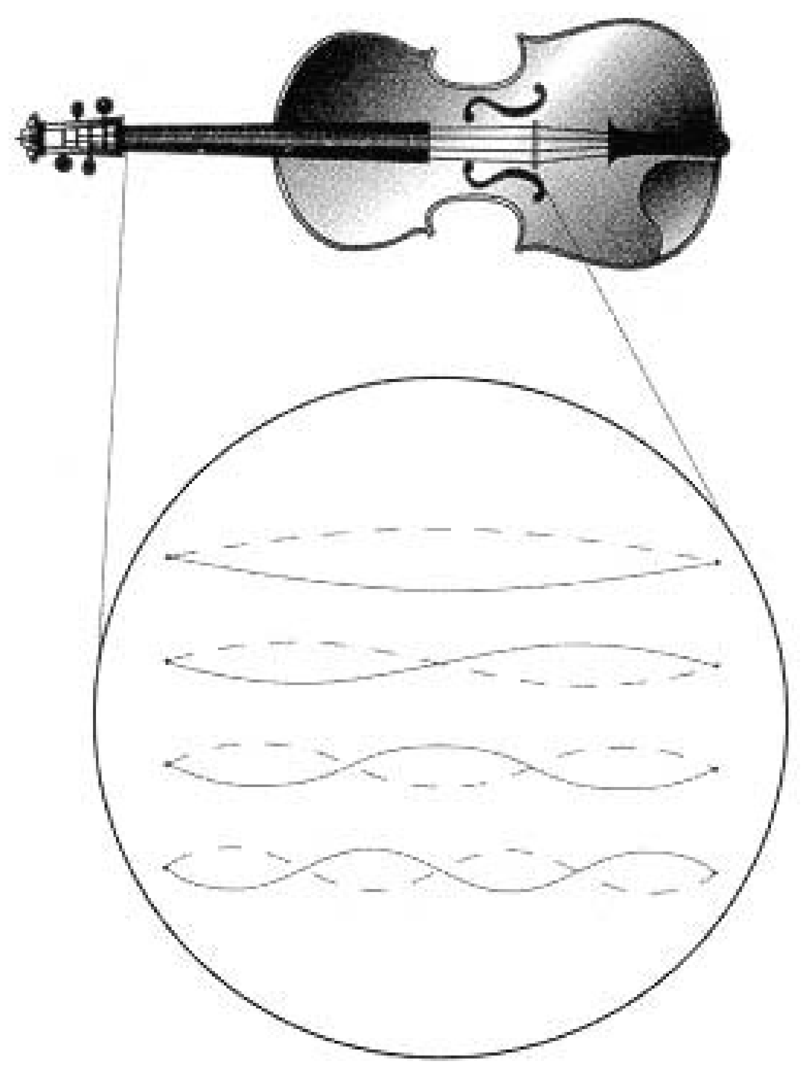


Figura 6.1 Las cuerdas de un violín pueden vibrar en patrones de resonancia en los cuales un número entero de picos y senos cabe exactamente entre los dos extremos.

Nuestros oídos perciben éstos diferentes modelos resonantes de vibración como notas musicales diferenciadas. Las cuerdas de la teoría de cuerdas tienen unas propiedades similares. Hay patrones vibratorios de resonancia la cuerda puede sustentar en virtud de sus picos y senos uniformemente espaciados y que encajan perfectamente a lo largo de su extensión espacial. En la Figura 6.2 se ofrecen algunos ejemplos. He aquí el hecho crucial: del mismo modo que las diferentes pautas vibratorias de la cuerda de un violín dan lugar a diferentes notas musicales, *los diferentes patrones vibratorios de una cuerda fundamental dan lugar a diferentes masas y carga de fuerza*. Como se trata de un aspecto crucial, vamos a enunciarlo otra vez. Según la teoría de cuerdas, las propiedades de una «partícula» elemental —su masa y sus distintas cargas de fuerza— están determinadas por el modelo resonante exacto de vibración que ejecuta su cuerda interna.

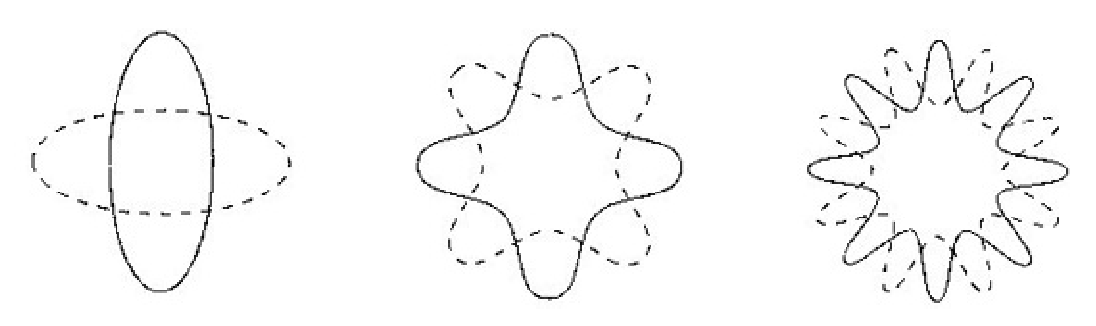


Figura 6.2 En la teoría de cuerdas, los bucles pueden vibrar mediante patrones de resonancia —similares a los de las cuerdas del violín— en los que un número entero de picos y senos encaja a lo largo de su extensión espacial.

Lo más fácil es comprender esta asociación en el caso de la masa de una partícula. La energía de un patrón vibratorio concreto de una cuerda depende de su amplitud —el máximo desplazamiento entre picos y senos— y de su longitud de onda —la separación entre un pico y el siguiente—. Cuanto mayor sea la amplitud y más corta sea la longitud de onda, mayor es la energía. Esto refleja lo que podríamos suponer intuitivamente —los modelos vibratorios más frenéticos poseen más energía, mientras que los menos frenéticos poseen menos energía—. Ofrecemos un par de ejemplos en la Figura 6.3. Esto también nos resulta familiar, ya que, cuando las cuerdas de un violín se pulsan más vigorosamente, vibran de un modo más intenso, mientras que, si se pulsan con más cautela, vibran más despacio. Ahora bien, a partir de la relatividad especial sabemos que la energía y la masa son dos caras de la misma moneda: más energía significa más masa y viceversa. En este sentido, según la teoría de cuerdas, la masa de una partícula elemental está determinada por la *energía* del modelo vibratorio de su cuerda interna. Las partículas que son más pesadas tienen cuerdas internas que vibran más energéticamente, mientras que aquellas partículas que son más ligeras tienen cuerdas internas que vibran menos energéticamente.

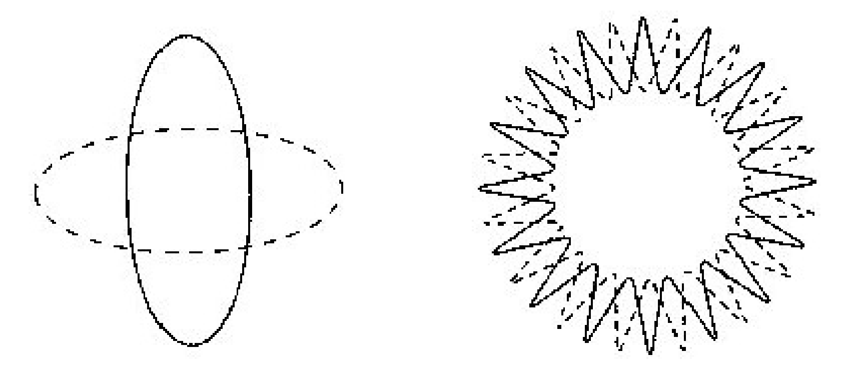


Figura 6.3 Los patrones vibratorios más frenéticos tienen más energía que los menos frenéticos.

Dado que la masa de una partícula determina sus propiedades gravitatorias, vemos que existe una relación directa entre el modelo de vibración de la cuerda y la respuesta de la partícula ante la fuerza de la gravedad. Aunque el razonamiento correspondiente es algo más abstracto, los físicos han descubierto que existe un

alineamiento similar entre otros aspectos del patrón vibratorio de una cuerda y sus propiedades con respecto a otras fuerzas. Por ejemplo, la carga eléctrica, la carga débil y la carga fuerte que transporta una cuerda concreta están determinadas por el modo exacto de vibración de dicha cuerda. Además, es aplicable exactamente la misma idea a las propias partículas mensajeras. Partículas tales como los fotones, los bosones gauge débiles y los gluones son otros modelos resonantes de vibración de cuerdas. Y, algo que es especialmente importante, entre los modelos vibratorios de las cuerdas, hay uno que encaja perfectamente con las propiedades del gravitón, lo cual permite asegurar que la gravedad es una parte integral de la teoría de cuerdas.[45]

Por lo tanto, vemos que, según la teoría de cuerdas, las propiedades observadas con respecto a cada partícula elemental surgen del hecho de que su cuerda interior está sometida a un patrón vibratorio de resonancia concreto. Este punto de vista difiere claramente del expuesto por los físicos antes del descubrimiento de la teoría de cuerdas; según el punto de vista anterior, las diferencias entre las partículas fundamentales se explicaban diciendo que, en efecto, cada tipo de partícula estaba «configurada por un tejido diferente». Aunque cada partícula se consideraba elemental, se pensaba que era diferente el tipo de «material» de cada una. El «material» del electrón, por ejemplo, poseía carga eléctrica negativa, mientras que el «material» del neutrino no tenía carga eléctrica. La teoría de cuerdas altera esta imagen radicalmente cuando afirma que el «material» de toda la materia y de todas las fuerzas es el *mismo*. Cada partícula elemental está formada por una sola cuerda —es decir, cada partícula individual es una cuerda individual— y todas las cuerdas son absolutamente idénticas. Las diferencias entre las distintas partículas surgen debido a que sus cuerdas respectivas están sometidas a patrones vibratorios de resonancia diferentes. Lo que se presenta como partículas elementales diferentes son en realidad las distintas «notas» que produce una cuerda fundamental. El universo —que está compuesto por un número enorme de esas cuerdas vibrantes— es algo semejante a una sinfonía cósmica.

Este panorama general muestra cómo la teoría de cuerdas ofrece un marco unificador realmente maravilloso. Cada partícula de la materia y cada transmisor de fuerza consiste en una cuerda cuyo patrón de vibración es su «huella dactilar». Dado que todo suceso, proceso o acontecimiento físico del universo se puede describir, a su nivel más elemental, en términos de fuerzas que actúan entre esos constituyentes materiales elementales, la teoría de cuerdas ofrece la promesa de una descripción única, global y unificada del universo físico: una teoría de todas las cosas. *(T.O.E.: theory of everything).*

La música de la teoría de cuerdas

Aunque la teoría de cuerdas desplaza el concepto anterior de partículas elementales no estructuradas, el viejo lenguaje se resiste a morir, especialmente cuando proporciona una exacta descripción de la realidad hasta la más diminuta de las escalas de distancias. Siguiendo la práctica común en este medio, seguiremos utilizando la expresión «partículas elementales», aunque siempre con el significado de «lo que parecen ser partículas elementales, pero son en realidad trozos diminutos de cuerdas que están vibrando». En la sección anterior proponíamos la idea de que las masas y las cargas de fuerza de estas partículas elementales son el resultado del modo en el que sus respectivas cuerdas están vibrando. Esto nos lleva a la siguiente conclusión: si podemos desarrollar con precisión los posibles patrones vibratorios de resonancia de las cuerdas fundamentales —las «notas», por decirlo así, que pueden tocar— seremos capaces de explicar las propiedades que se han observado en las partículas elementales. En consecuencia, por primera vez, la teoría de cuerdas establece un marco para la *explicación* de las propiedades de las partículas que se detectan en la naturaleza.

Entonces, en este punto, tendríamos que «agarrar» una cuerda y «pulsarla» de todas las maneras posibles para determinar todos los patrones resonantes de vibración posibles. Si la teoría de cuerdas es correcta, tendríamos que descubrir que los patrones posibles producen exactamente las propiedades observadas para la materia y las partículas de fuerza de las Tablas 1.1 y 1.2. Desde luego, una cuerda es demasiado pequeña para que podamos realizar este experimento tan literalmente como lo describimos. En cambio, utilizando descripciones matemáticas podemos pulsar una cuerda *teóricamente*. A mediados de la década de 1980, muchos partidarios de la teoría de cuerdas creían que el análisis matemático necesario para hacer esto estaba a punto de ser capaz de explicar cada una de las propiedades del universo en su nivel más microscópico. Algunos físicos entusiastas declararon que por fin se había descubierto la T.O.E. En una visión retrospectiva, después de una década está demostrado que la euforia generada por esta creencia era prematura. La teoría de cuerdas tiene cualidades para llegar a ser una T.O.E., pero siguen existiendo ciertos obstáculos que nos impiden deducir el espectro de vibraciones de las cuerdas con la precisión necesaria para estar en condiciones de hacer una comparación con los resultados experimentales. Por consiguiente, en el momento actual no sabemos si las características fundamentales de nuestro universo, resumidas en las Tablas 1.1 y 1.2, se pueden explicar mediante la teoría de cuerdas. Como veremos en el capítulo 9, bajo ciertas hipótesis que detallaremos claramente, la teoría de cuerdas puede dar lugar a un universo con propiedades que están cualitativamente de acuerdo con los datos conocidos sobre partículas y fuerzas, pero extraer predicciones numéricas

detalladas a partir de la teoría está actualmente más allá de nuestras posibilidades. Así, aunque el marco de la teoría de cuerdas, a diferencia del modelo estándar de las partículas puntuales, es *capaz* de explicar por qué las partículas y las fuerzas tienen las propiedades que tienen, hasta ahora no hemos podido deducir esta explicación. Sin embargo, lo que llama la atención es que la teoría de cuerdas es tan rica y tiene tanto alcance que, incluso aunque todavía no podamos determinar la mayoría de las propiedades con detalle, nosotros *somos* capaces de hacernos una idea sobre la enorme cantidad de fenómenos físicos nuevos que se deducen de esta teoría, como veremos en los próximos capítulos.

En los capítulos siguientes comentaremos también con cierto detalle la situación en que se encuentran los obstáculos existentes, pero lo más instructivo es comprenderlos primero a un nivel general. Las cuerdas que se encuentran en el mundo que nos rodea se presentan con distintas tensiones. Por ejemplo, el cordón que ata unos zapatos está habitualmente bastante flojo en comparación con la cuerda que se sujeta en un violín de un extremo al otro. Ambos, a su vez, están sujetos con una tensión mucho menor que las cuerdas metálicas de un piano. El número que requiere la teoría de cuerdas para establecer su escala general es la tensión correspondiente a cada uno de sus bucles. ¿Cómo se determina esta tensión? Bueno, si pudiéramos pulsar una cuerda fundamental conoceríamos algo sobre su rigidez, y de esta manera podríamos medir su tensión de una forma parecida a como se mide en otras cuerdas que nos resultan más familiares en la vida cotidiana. Pero, dado que las cuerdas fundamentales son tan diminutas, este planteamiento no se puede aplicar, por lo que se necesita un método más indirecto. En 1974, cuando Scherk y Schwarz propusieron que un patrón concreto de vibración de cuerdas fuera la partícula llamada gravitón, pudieron valerse de este planteamiento indirecto y así predecir la tensión de las cuerdas dentro de la teoría de cuerdas. Sus cálculos pusieron de manifiesto que la intensidad de la fuerza transmitida por el propuesto patrón de vibración de cuerda del gravitón era inversamente proporcional a la tensión de la cuerda en cuestión. Dado que se supone que el gravitón transmite la fuerza gravitatoria —una fuerza que es intrínsecamente bastante débil— descubrieron que esto implica una tensión colosal de mil billones de billones de billones (10^{39}) de toneladas, la llamada *tensión de Planck*. Las cuerdas fundamentales son por consiguiente extremadamente rígidas comparadas con otros ejemplos más conocidos. Esto tiene tres consecuencias importantes.

Tres consecuencias de las cuerdas rígidas

En primer lugar, mientras los extremos de una cuerda de violín o piano están sujetas, garantizando así que tengan una longitud fija, no existe un marco restrictivo análogo que fije el tamaño de una cuerda fundamental. En vez de eso, es la enorme tensión de la cuerda la que hace que los bucles de la teoría de cuerdas se contraigan hasta alcanzar un tamaño minúsculo. Hay cálculos minuciosos que indican que el hecho de estar bajo la tensión de Planck se traduce en que una cuerda típica tenga la longitud de Planck, es decir, 10^{-33} centímetros, como se ha mencionado anteriormente.[46]

En segundo lugar, debido a la enorme tensión, la energía normal de un bucle vibrador según la teoría de cuerdas es extremadamente elevada. Para comprender esto, diremos que cuanto mayor es la tensión a la que está sometida una cuerda, más difícil es hacerla vibrar. Por ejemplo, es mucho más fácil pulsar una cuerda de violín y hacerla vibrar que pulsar una cuerda de piano. Por lo tanto, dos cuerdas que están sometidas a diferentes tensiones y están vibrando exactamente del mismo modo no tendrán la misma energía. La cuerda que esté sometida a mayor tensión tendrá más energía que aquella que está sometida a menor tensión, ya que se debe ejercer una mayor energía para ponerla en movimiento.

Esto nos llama la atención sobre el hecho de que la energía de una cuerda en vibración está determinada por dos cosas: la manera exacta en la que vibra (los patrones más frenéticos corresponden a energías más elevadas) y la tensión de la cuerda (una mayor tensión se corresponde con una energía mayor). Al principio, esta descripción podría hacer pensar que adoptando pautas vibratorias cada vez más moderadas —pautas con amplitudes cada vez menores y menos picos y senos— una cuerda puede tener cada vez menos energía. Sin embargo, tal como descubrimos en el capítulo 4 en un contexto diferente, la mecánica cuántica nos dice que este razonamiento no es correcto. Como sucede con todas las vibraciones y todas las perturbaciones ondulatorias, la mecánica cuántica implica que sólo pueden existir en unidades discretas. Hablando de un modo aproximado, del mismo modo que el dinero que lleva un individuo en el almacén es un múltiplo *entero* de la denominación monetaria de la que está provisto, la energía contenida en un modelo vibratorio de una cuerda es un múltiplo entero de una denominación energética mínima. Concretamente, esta denominación energética mínima es proporcional a la tensión de la cuerda (y también es proporcional al número de picos y senos que hay en el patrón vibratorio particular), mientras que el múltiplo entero está determinado por la amplitud del patrón vibratorio.

La cuestión clave de la presente discusión es ésta: dado que las denominaciones energéticas mínimas son proporcionales a la tensión de la cuerda, y dado que esta tensión es enorme, las energías fundamentales mínimas son, de un modo similar, en las escalas habituales para las partículas físicas elementales, también enormes. Son múltiplos de lo que se conoce como la *energía de Planck*. Para hacernos una idea de

la escala, si traducimos la energía de Planck a masa utilizando la famosa fórmula de conversión de Einstein $E = mc^2$, corresponden a masas que son del orden de diez millones de billones (10^{19}) de veces la de un protón. Esta masa gigantesca —en las partículas elementales estándar— se conoce como *la masa de Planck*; es aproximadamente igual a la masa de una mota de polvo o a la de un conjunto de un millón de bacterias de tipo medio. Así pues, el equivalente de masa típico de un bucle vibratorio en la teoría de cuerdas es generalmente un cierto número entero (1, 2, 3, …) de veces la masa de Planck. Los físicos expresan esto a menudo diciendo que la escala «natural» o «típica» de energía (y por lo tanto la escala de masa) de la teoría de cuerdas es la escala de Planck.

Esto plantea una pregunta crucial relacionada directamente con el objetivo de reproducir las propiedades de las partículas que se indican en las Tablas 1.1 y 1.2: si la escala de energía «natural» de la teoría de cuerdas es de diez millones de billones de veces la de un protón, ¿cómo puede esto repercutir en las partículas mucho más ligeras (electrones, quarks, fotones, etc). que forman el mundo que nos rodea?

La respuesta, una vez más, viene de la mano de la mecánica cuántica. El principio de incertidumbre asegura que nada hay que se encuentre totalmente en reposo. Todos los objetos están sometidos al temblor cuántico, porque, si no lo estuvieran, podríamos saber con toda precisión dónde están y a qué velocidad se mueven, en contra de lo que afirmó Heisenberg. Esto es cierto también en el caso de los bucles en la teoría de cuerdas: independientemente de lo tranquila que parezca una cuerda, siempre experimentará una cierta cantidad de vibración cuántica. Lo que llama la atención es un original hallazgo de la década de 1970, según el cual pueden existir *cancelaciones* de energía entre esos temblores cuánticos y el tipo más intuitivo de vibraciones de cuerda que hemos comentado anteriormente y hemos representado en las Figuras 6.2 y 6.3. En efecto, por la rareza de la mecánica cuántica, la energía asociada al temblor cuántico de una cuerda es *negativa*, y esto *reduce* la energía total contenida en una cuerda vibrante, produciéndose esta reducción en una cantidad que es aproximadamente igual a la energía de Planck. Esto significa que los modelos vibratorios de baja energía de las cuerdas, de cuyas energías esperaríamos ingenuamente que tuvieran aproximadamente un valor igual a la energía de Planck (es decir, 1 por la energía de Planck), se cancelan en gran medida, produciendo así unas vibraciones de energía neta relativamente baja —energías cuyos equivalentes de masa correspondientes están muy próximos a las masas de las partículas de materia y fuerza que se recogen en las Tablas 1.1 y 1.2—. Por consiguiente, son estos patrones vibratorios de energía *mínima* los que proporcionan una conexión entre la descripción teórica de las cuerdas y la parcela que es experimentalmente accesible dentro de la física de partículas. Como ejemplo importante, diremos que Scherk y Schwarz descubrieron que, por lo que respecta al patrón vibratorio que por sus propiedades era

candidato a ser la partícula mensajera llamada gravitón, las cancelaciones de energía eran *perfectas*, dando como resultado una partícula de la fuerza de la gravedad con masa cero. Esto es precisamente lo que se espera del gravitón; la fuerza de la gravedad se transmite a la velocidad de la luz y sólo las partículas sin masa pueden viajar a esta velocidad máxima. Pero las combinaciones vibratorias de baja energía son más bien la excepción, y no la regla. La cuerda fundamental vibratoria más típica corresponde a una partícula cuya masa es miles de billones de veces mayor que la del protón.

Esto nos dice que las partículas fundamentales, comparativamente ligeras, de las Tablas 1.1 y 1.2 habrían de surgir, en cierto modo, de la fina niebla que cubre el océano rugiente de las cuerdas energéticas. Incluso una partícula tan pesada como el quark top, cuya masa es alrededor de 189 veces la del protón, puede surgir de una cuerda en vibración, sólo si la enorme energía característica de la cuerda a escala de Planck se anula debido a los temblores de la incertidumbre cuántica hasta más de una parte entre cien mil billones. Es como si usted estuviera jugando en *El precio justo* y el presentador le diera diez trillones de dólares, desafiándole a que comprara productos que le costaran —que anularan, por decirlo así— todo menos 189 de esos dólares, ni un dólar más, ni uno menos. La propuesta de un gasto tan enorme, y a la vez exacto, sin estar al tanto de los precios exactos de los artículos, desafiaría seriamente el ingenio de los más expertos compradores del mundo. En la teoría de cuerdas, donde la divisa es energía en vez de dinero, mediante cálculos aproximados se ha determinado de forma concluyente que ciertamente *pueden* producirse anulaciones análogas de energía, pero, por razones que se irán aclarando en sucesivos capítulos, la verificación de las anulaciones con un nivel tan alto de precisión está en general por ahora más allá de nuestro alcance en cuanto a conocimientos teóricos. Incluso así, como ya hemos dicho antes, veremos que muchas otras propiedades de la teoría de cuerdas que son menos sensibles a esta finura de detalles, se pueden deducir y comprender con seguridad.

Esto nos lleva a la tercera consecuencia del enorme valor que alcanza la tensión de las cuerdas. Las cuerdas pueden ejecutar un número infinito de patrones vibratorios diferentes. Por ejemplo, en la Figura 6.2 mostrábamos los inicios de una sucesión interminable de posibilidades caracterizadas por un número cada vez mayor de picos y senos. ¿No significará esto que tendría que existir la correspondiente sucesión interminable de partículas elementales, lo cual estaría en conflicto con la situación experimental reflejada en las Tablas 1.1 y 1.2?

La respuesta es afirmativa: si la teoría de cuerdas es correcta, cada uno de los infinitos patrones de resonancia que existen para la vibración de las cuerdas tendría que corresponder a una partícula elemental. Sin embargo, un punto esencial es que la alta tensión de las cuerdas garantiza que casi todos los modelos de vibración

corresponderán a partículas extremadamente pesadas (siendo los pocos modelos restantes las vibraciones de mínima energía en las que se producen unas cancelaciones casi perfectas con los temblores cuánticos de las cuerdas). De nuevo, el término «pesadas» significa aquí que las partículas son muchas veces más pesadas que la masa de Planck. Dado que nuestros más poderosos aceleradores de partículas pueden alcanzar energías sólo del orden de mil veces la masa del protón, menos de la milésima de una billonésima de la energía de Planck, estamos muy lejos de ser capaces de buscar en el laboratorio cualquiera de esas nuevas partículas que predice la teoría de cuerdas.

No obstante, hay otros planteamientos más indirectos mediante los cuales podemos buscarlas. Por ejemplo, las energías presentes en el nacimiento del universo habrían sido lo bastante elevadas como para producir estas partículas en abundancia. En general, no sería de esperar que hubieran sobrevivido hasta el momento actual, ya que unas partículas tan extraordinariamente pesadas son en general inestables, pues se desprenden de su enorme masa desintegrándose en una cascada de partículas cada vez más ligeras y terminando con las partículas conocidas y relativamente ligeras del entorno que nos rodea. Sin embargo, es posible que este estado de cuerda vibratoria tan extraordinariamente pesada —una reliquia del big bang— sobreviviera hasta nuestros días. El hallazgo de este tipo de partículas, como veremos de una manera más completa en el capítulo 9, constituiría al menos un monumental descubrimiento.

La gravedad y la mecánica cuántica en la teoría de cuerdas

El marco unificado que presenta la teoría de cuerdas es algo que urge conseguir. Pero su atractivo real reside en la capacidad de aliviar las hostilidades entre la fuerza de la gravedad y la mecánica cuántica. Recordemos que el problema que obstaculiza la fusión de la relatividad general y la mecánica cuántica surge cuando el principio fundamental de la primera —que el espacio y el tiempo constituyen una estructura geométrica curvada de una forma continua— se confronta con la característica esencial de la segunda —que todo en el universo, incluida la estructura del espacio y el tiempo, está sometido a fluctuaciones cuánticas que se vuelven cada vez más turbulentas cuando se comprueban a escalas de distancias cada vez más pequeñas—. A distancias de una escala inferior a la de Planck, las ondulaciones cuánticas son tan violentas que destrozan la noción de espacio geométrico con curvatura continua; esto significa que la relatividad general se desmorona.

La teoría de cuerdas suaviza las violentas ondulaciones cuánticas «difuminando»

las propiedades del espacio a distancias cortas. Existe una respuesta aproximada y otra más precisa a la pregunta de qué significa realmente esto y cómo resuelve el conflicto. A su debido tiempo comentaremos todo esto.

La respuesta aproximada

Aunque parezca un método poco sofisticado, una forma de aprender algo sobre la estructura de un objeto consiste en lanzar otras cosas contra él y observar el modo exacto en que son desviadas. Por ejemplo, somos capaces de *ver* objetos porque nuestros ojos recogen información y nuestros cerebros la descodifican, cuando nos llega esta información transportada por los fotones al rebotar éstos sobre los objetos que estamos contemplando. Los aceleradores de partículas se basan en el mismo principio: lanzan fragmentos de materia tales como electrones y protones unos contra otros, así como contra otros objetivos, y unos complicados detectores analizan el reguero de residuos resultante para determinar la estructura de los objetos implicados.

Como regla general, el *tamaño de la partícula de sondeo* que utilicemos fija un límite inferior para la escala de longitudes a la que somos sensibles. Para hacernos una idea de lo que significa esta importante afirmación, supongamos que Slim y Jim se deciden a adquirir un poco de cultura, apuntándose a una clase de dibujo. A medida que avanza el semestre, Jim se irrita cada vez más viendo la pericia cada vez mayor de Slim como artista y le desafía a una competición inusual. La propuesta es que cada uno de ellos tome un hueso de melocotón, lo sujete a un tornillo de banco y dibuje su más precisa interpretación de esta «naturaleza muerta». La característica inusual del desafío de Jim es que ni a él ni a Slim se les permite mirar a los huesos de melocotón. Lo único que sí se les permite es conocer el tamaño, la forma y las características de su hueso de melocotón lanzándole objetos (¡siempre que éstos no sean fotones!) y observando cómo son desviados estos objetos, tal como se representa en la Figura 6.4. Sin que Slim lo sepa, Jim llena con canicas el «lanzador» de Slim (como en la Figura 6.4 (a), pero llena su propio disparador con unos perdigones de goma de cinco milímetros, mucho más pequeños que las canicas (como se ve en la Figura 6.4 (b). Ambos ponen en marcha sus disparadores y la competición comienza.

Al cabo de un rato, lo mejor que Slim puede conseguir dibujar es lo que aparece en la Figura 6.4 (a). Observando las trayectorias de las canicas desviadas, Slim puede saber que el hueso es una masa pequeña y de superficie dura. Pero esto es todo lo que puede saber. Las canicas son demasiado grandes para ser sensibles a la estructura finamente estriada del hueso de melocotón. Cuando Slim echa un vistazo al dibujo de

Jim (Figura 6.4 (b)), se sorprende al ver que supera al suyo. Sin embargo, una mirada rápida al lanzador de Jim le revela el secreto: las partículas de sondeo que ha utilizado Jim son de menor tamaño y lo suficientemente finas para que su ángulo de desviación resulte afectado por algunas de las mayores estrías que adornan la superficie del hueso. Por esta razón, disparando muchos perdigones de cinco milímetros al hueso y observando sus trayectorias desviadas, Jim ha podido dibujar una imagen más detallada. Slim, para no ser vencido, vuelve a su lanzador, lo llena con unas partículas de sondeo aún más pequeñas —perdigones de medio milímetro— que son lo suficientemente diminutas como para penetrar y por consiguiente ser desviadas por las estrías más finas de la superficie del hueso. Observando cómo son desviadas estas partículas de sondeo cuando chocan, puede lograr el dibujo ganador que se muestra en la Figura 6.4 (c).

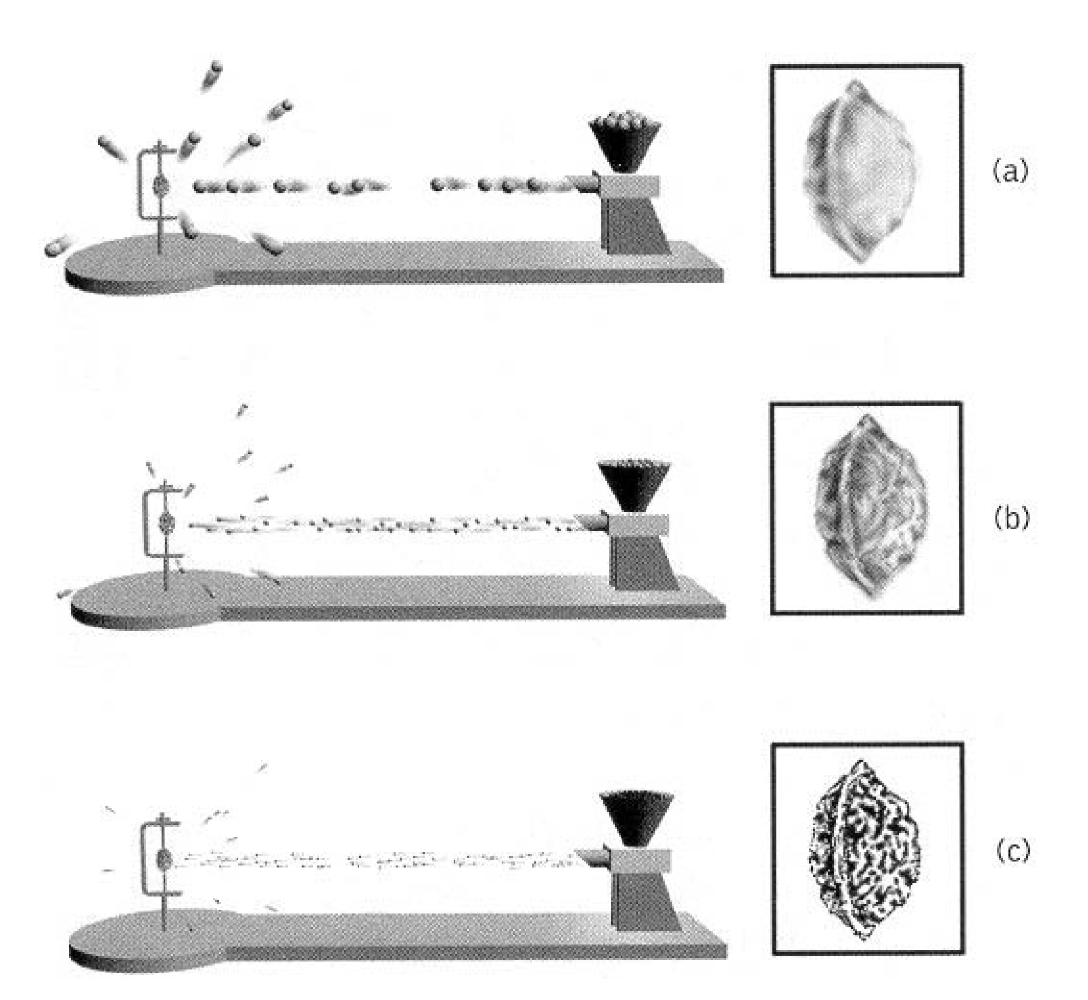


Figura 6.4 Un hueso de melocotón se fija en un tornillo de banco y se dibuja exclusivamente observando cómo se desvían los objetos —«sondas»— lanzados contra dicho hueso. Utilizando sondas aún más pequeñas —(a) canicas, (b) perdigones de cinco milímetros, (c) perdigones de medio milímetro— se pueden dibujar imágenes aún más detalladas.

La lección que enseña esta pequeña competición está clara: las partículas de prueba que resultan útiles no pueden ser de mayor tamaño que las características físicas que se examinan; si son mayores, no serán sensibles a las estructuras que

interesa determinar.

El mismo razonamiento es aplicable, por supuesto, si se desea sondear el hueso aún más profundamente para determinar sus estructuras atómica y subatómica. Los perdigones de medio milímetro no proporcionan información útil; está claro que son demasiado grandes para tener sensibilidad a las estructuras que se presentan a escala atómica. Ésta es la razón por la cual los aceleradores de partículas utilizan protones o electrones como sondas, ya que su pequeño tamaño hace que sean mucho más adecuadas para la tarea. A escalas subatómicas, en las que los conceptos cuánticos sustituyen al razonamiento clásico, la medida más apropiada de la sensibilidad de una partícula de sondeo es su longitud de onda cuántica, que es un indicador de la amplitud de la incertidumbre en su posición. Este hecho refleja lo que comentamos sobre el principio de incertidumbre de Heisenberg en el capítulo 4, en el que descubrimos que el margen de error cuando utilizamos una partícula puntual como sonda (nos centramos en los fotones como partículas de sondeo, pero la discusión es válida para todas las demás partículas) es aproximadamente igual a la longitud de onda cuántica de la partícula de sondeo. En un lenguaje un poco más informal, la sensibilidad de sondeo de una partícula puntual resulta disminuida por la idea de temblor de la mecánica cuántica, prácticamente del mismo modo que el escalpelo de un cirujano resulta obstaculizado si sus manos tiemblan. Pero recordemos que en el capítulo 4 habíamos observado también el importante hecho de que la longitud de onda cuántica de una partícula es inversamente proporcional a su ímpetu, que, hablando de un modo aproximado, es su energía. Así pues, aumentando la energía de una partícula puntual, su longitud de onda cuántica puede hacerse más y más corta —la dispersión cuántica puede reducirse progresivamente— y, consiguientemente, podemos utilizar esta partícula para sondear estructuras físicas aún más finas. Intuitivamente, las partículas dotadas de una energía superior tienen un mayor poder de penetración y, por lo tanto, son capaces de sondear rasgos todavía más diminutos en una estructura.

A este respecto, la distinción entre partículas puntuales y ramales de cuerda se vuelve evidente. Al igual que en el caso de los perdigones de goma que sondeaban las rugosidades en la superficie de un hueso de melocotón, la extensión espacial inherente a la cuerda le impide a ésta poder sondear la estructura de algo que sea sustancialmente menor que su propio tamaño; en este caso, hablamos de estructuras que existan a escalas de longitud menores que la longitud de Planck. Precisando un poco más, en 1988 David Gross, que entonces trabajaba en la Universidad de Princeton, y su discípulo Paul Mende demostraron que, cuando se tiene en cuenta la mecánica cuántica, el hecho de incrementar de forma continua la energía de una cuerda *no* hace que se incremente continuamente su capacidad para sondear estructuras más finas, exactamente al contrario de lo que sucede con una partícula

puntual. Descubrieron que, cuando se aumenta la energía de una cuerda, al principio es capaz de sondear estructuras a menor escala, igual que una partícula puntual energética. Sin embargo, cuando su energía aumenta más allá del valor requerido para sondear estructuras a la escala de la longitud de Planck, la energía adicional no agudiza la capacidad de sondeo de la cuerda. Al contrario, la energía hace que la cuerda aumente de tamaño, *disminuyendo* así su sensibilidad a las longitudes cortas. De hecho, aunque el tamaño de una cuerda normal es la longitud de Planck, si introducimos suficiente energía en una cuerda —una cantidad de energía que está más allá de nuestras más atrevidas fantasías, pero que probablemente se alcanzara durante el *big bang*— podríamos hacer que creciera hasta alcanzar un tamaño *macroscópico*, lo que la convertiría en una sonda muy torpe para el microcosmos. Es como si una cuerda, a diferencia de una partícula puntual, tuviera *dos* causas de dispersión: los temblores cuánticos, como en el caso de una partícula puntual, y también su propia e inherente extensión espacial. Incrementando la energía de una cuerda, se hace que disminuya la dispersión producida por la primera causa, pero en última instancia aumenta la dispersión producida por la segunda. El resultado es que, independientemente de lo que nos esforcemos, la forma alargada de una cuerda impide que la utilicemos para fenómenos relacionados con el sondeo en intervalos de espacio inferiores a la longitud de Planck.

Sin embargo, todo el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica surge de las propiedades de la estructura espacial relacionadas con longitudes inferiores a la de Planck. *Si el constituyente elemental del universo no puede sondear longitudes que están por debajo de la escala de Planck, entonces ni este constituyente, ni otra cosa que esté hecha a partir de él, pueden verse afectados por las supuestamente desastrosas ondulaciones cuánticas de distancias cortas*. Esto es similar a lo que sucede cuando pasamos la mano sobre una superficie de granito muy pulimentada. Aunque a nivel microscópico el granito es discreto, granuloso y desigual, nuestros dedos no pueden detectar esas variaciones a pequeña escala y percibimos una superficie perfectamente lisa. Nuestros dedos alargados y romos «dispersan y eliminan» el carácter discreto microscópico del relieve. De manera similar, puesto que la cuerda tiene extensión espacial, también tiene limitaciones en su sensibilidad de las distancias cortas. No puede detectar variaciones a escalas inferiores a la distancia de Planck. Como nuestros dedos sobre el granito, la cuerda dispersa y elimina las temblorosas fluctuaciones ultramicroscópicas del campo gravitatorio. Aunque las fluctuaciones resultantes siguen siendo importantes, esta dispersión las alisa lo suficiente para remediar la incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Además, en particular, por lo que respecta a las perniciosas infinitudes (comentadas en el capítulo anterior) que aparecen en el planteamiento basado en las partículas puntuales cuando se intenta construir una

teoría cuántica de la gravedad, estas infinitudes quedan suprimidas utilizando la teoría de cuerdas.

Una diferencia esencial entre la analogía del granito y nuestro problema real relativo a la estructura del espacio es que *existen* maneras de poner de manifiesto el carácter microscópico discreto de la superficie de granito: se pueden utilizar sondas más finas y precisas que nuestros dedos. Un microscopio electrónico tiene la resolución necesaria para hacer visibles las características de la superficie hasta longitudes inferiores a una millonésima de centímetro; esta escala es lo suficientemente pequeña como para poner de manifiesto las numerosas imperfecciones de la superficie. En cambio, en la teoría de cuerdas no hay manera de hacer aparentes las «imperfecciones» de la estructura del espacio a una escala inferior a la de Planck. En un universo gobernado por las leyes de la teoría de cuerdas, la idea convencional de que siempre podemos diseccionar la naturaleza a escalas cada vez menores, sin límite, no es verdadera. Existe un límite, y éste entra en el juego antes de que nos encontremos con la devastadora espuma cuántica de la Figura 5.1. Por consiguiente, en un cierto sentido que concretaremos mejor en próximos capítulos, incluso se puede decir que *no existen* las supuestas y tempestuosas ondulaciones cuánticas a escala inferior a la de Planck. Un positivista afirmaría que algo existe sólo si se puede —al menos en principio— detectar y medir. Dado que se supone que la cuerda es el objeto más elemental del universo y puesto que es demasiado ancha para verse afectada por las violentas ondulaciones de la estructura espacial a escalas inferiores a la de Planck, no es posible medir estas fluctuaciones y, en consecuencia, según la teoría de cuerdas, en realidad no se producen.

¿Un juego de prestidigitación?

Puede que usted se sienta insatisfecho después de estas explicaciones. En vez de demostrar que la teoría de cuerdas consigue domar las ondulaciones cuánticas del espacio a escalas inferiores a la de Planck, parece como si hubiéramos utilizado el tamaño no nulo de las cuerdas para esquivar la cuestión completamente. ¿Hemos resuelto realmente algo? Sí que lo hemos hecho. Los dos puntos que aclaramos a continuación sirven para recalcar esto.

En primer lugar, lo que implica la anterior argumentación es que las supuestamente problemáticas ondulaciones espaciales a escalas inferiores a la de Planck son un resultado de formular la relatividad general y la mecánica cuántica en el marco de las partículas puntuales. Por lo tanto, en cierto modo, el conflicto central

de la física teórica contemporánea ha sido un problema que nos hemos creado nosotros mismos. Debido a que anteriormente considerábamos que todas las partículas de la materia y de las fuerzas eran objetos similares a puntos sin extensión espacial, nos vimos obligados a pensar en propiedades del universo a escalas de distancias arbitrariamente cortas. Posteriormente, en las distancias más diminutas fue donde caímos en dificultades aparentemente insalvables. La teoría de cuerdas nos dice que hemos tropezado con dichos problemas sólo porque no comprendimos las auténticas reglas del juego; las nuevas reglas nos dicen que existe un límite para la reducción de la escala a la que podemos sondear el universo —y, en un sentido real, un límite para la escala a la que nuestra idea convencional de distancia se puede aplicar a la estructura ultramicroscópica del cosmos—. Ahora se ve que las supuestas fluctuaciones espaciales perniciosas han surgido en nuestras teorías porque no éramos conscientes de estos límites y nos dejamos llevar por un planteamiento mediante partículas puntuales para sobrepasar de una manera excesiva las fronteras de la realidad física.

Dada la aparente sencillez de esta solución pensada para superar el problema existente entre la relatividad general y la mecánica cuántica, usted puede preguntarse por qué llevó tanto tiempo que alguien llegara a sugerir que el modelo de partículas puntuales es meramente una idealización y que en el mundo real las partículas elementales tienen una cierta extensión espacial. Esto nos lleva al segundo punto. Hace mucho tiempo, algunos de los mejores cerebros de la física teórica, como Pauli, Heisenberg, Dirac, y Feynman, *sugirieron* que los componentes de la naturaleza podrían no ser realmente puntos, sino más bien unas pequeñas «gotas» o «pepitas» ondulantes. Sin embargo, estos y otros físicos descubrieron que es muy difícil construir una teoría cuyo componente fundamental no sea una partícula puntual y que, no obstante, sea coherente con los principios físicos más básicos, tales como la conservación de la probabilidad en el sentido de la mecánica cuántica (de tal modo que los objetos físicos no se desvanezcan, desapareciendo repentinamente del universo, sin dejar rastro) y la imposibilidad de transmitir información a una velocidad mayor que la de la luz. Desde varios puntos de vista, su investigación demostraba una y otra vez que estos principios, o al menos uno de ellos, eran infringidos cuando se descartaba el paradigma de la partícula puntual. Por lo tanto, durante mucho tiempo, parecía imposible hallar una teoría cuántica razonable basada en algo que no fueran las partículas puntuales. La característica verdaderamente impresionante de la teoría de cuerdas es que más de veinte años de rigurosa investigación han demostrado que, aunque ciertos aspectos resultan extraños, la teoría de cuerdas *respeta* todas las propiedades necesarias inherentes a cualquier teoría física razonable. Además, por su idea del gravitón como modelo de vibración, la teoría de cuerdas es una teoría cuántica que incluye la gravedad.

La respuesta más precisa

La respuesta aproximada capta la esencia de por qué la teoría de cuerdas se sostiene allí donde las teorías de partículas puntuales han fallado. Así, si el lector lo desea, puede ir a la sección siguiente sin perder el hilo lógico de esta discusión. Pero, habiendo desarrollado las ideas esenciales de la relatividad especial en el capítulo 2, ya disponemos de las herramientas necesarias para describir más exactamente cómo la teoría de cuerdas calma los violentos temblores cuánticos.

En la respuesta más precisa, nos basamos en la misma idea fundamental que en la respuesta aproximada, pero la expresamos directamente a nivel de las cuerdas. Hacemos esto comparando, con cierto detalle, los sondeos realizados con partículas puntuales y con cuerdas. Veremos cómo la naturaleza alargada de las cuerdas dispersa la información que se podría obtener mediante sondeos con partículas puntuales, y consiguientemente, de nuevo, cómo destierra felizmente el comportamiento a distancias ultracortas que es responsable del dilema central de la física contemporánea.

Primero, pensemos de qué modo interaccionarían las partículas puntuales, si existieran realmente, y en consecuencia el modo en que se podrían utilizar como sondas físicas. La interacción más básica es la que se produce entre dos partículas puntuales que se mueven en un recorrido de choque, de tal manera que sus trayectorias van a producir una intersección, como se ve en la Figura 6.5. Si estas partículas fueran bolas de billar, colisionarían y cada una de ellas se vería desviada hacia una nueva trayectoria. La teoría cuántica de campos referida a las partículas puntuales demuestra que sucede esencialmente lo mismo cuando las partículas elementales chocan entre sí —se empujan mutuamente y continúan su camino con sus trayectorias desviadas— pero los detalles son un poco diferentes.



Figura 6.5 Dos partículas interactúan —«chocan entre sí»— lo cual hace que la trayectoria de cada una de ellas sufra una desviación.

Para hacer las cosas más concretas y sencillas, supongamos que una de las dos partículas es un electrón y la otra es su antipartícula, el positrón. Cuando la materia y la antimateria chocan entre sí, pueden aniquilarse en un destello de energía pura,

producíendo, por ejemplo, un fotón.[47] Para distinguir la trayectoria subsiguiente del fotón de las trayectorias anteriores del electrón y el positrón, nos atendremos a un convenio tradicional de la física y dibujaremos esta trayectoria del fotón mediante una línea oscilante. Lo habitual es que el fotón siga viajando así durante un tiempo y luego libere la energía derivada del par inicial electrón-positrón, produciendo otro par electrón— positrón con unas trayectorias como las que se indican en el extremo de la derecha en la Figura 6.6. En resumen, cuando dos partículas se disparan una contra otra, interaccionan mediante la fuerza electromagnética y finalmente emergen siguiendo trayectorias desviadas; una sucesión de acontecimientos que tiene una cierta similitud con nuestra descripción del choque de dos bolas de billar.

Nos interesan los detalles de la interacción; en particular el punto donde se aniquilan el electrón y el positrón iniciales, y producen el fotón. El hecho central es, como se verá, que existen un tiempo y un lugar, plenamente identificables y sin ambigüedades, donde esto sucede: está indicado expresamente en la Figura 6.6.



Figura 6.6 En la teoría de campos cuántica, una partícula y su antipartícula pueden momentáneamente aniquilarse mutuamente, produciendo un fotón. Luego, este fotón puede originar otra partícula y antipartícula que viajan en diferentes trayectorias.

¿Cómo cambiaría esta descripción si, cuando examinamos de cerca los objetos de los que pensábamos que eran puntos de dimensión cero, resultan ser cuerdas unidimensionales? El proceso básico de interacción es el mismo, pero ahora los objetos que van a chocar entre sí son bucles oscilantes, como se muestra en la Figura 6.7. Si estos bucles están vibrando según las pautas de resonancia correctas, corresponderán a un electrón y un positrón que están en vías de chocar, como se puede ver en la Figura 6.6. Únicamente cuando se examinan a las escalas de distancia más diminutas, mucho menores que cualquier cosa a la que la tecnología actual pueda tener acceso, se pone de manifiesto su carácter auténtico de cuerdas. Como en el caso de las partículas puntuales, las dos cuerdas chocan entre sí y se aniquilan la una a la otra en un destello de luz. Este destello de luz, un fotón, es él mismo una cuerda con un patrón vibratorio particular. Así, las dos cuerdas que se aproximan interaccionan fusionándose una con otra y produciendo una tercera cuerda, como se ve en la Figura 6.7. Igual que en la descripción que hicimos para partículas puntuales, esta cuerda viaja durante un corto trecho y luego libera la energía derivada de las dos cuerdas iniciales, disociándose en dos cuerdas que siguen su marcha hacia delante. Una vez más, desde cualquier perspectiva que no sea la más microscópica, este proceso

parecerá igual al de la interacción entre partículas puntuales que se muestra en la Figura 6.6.

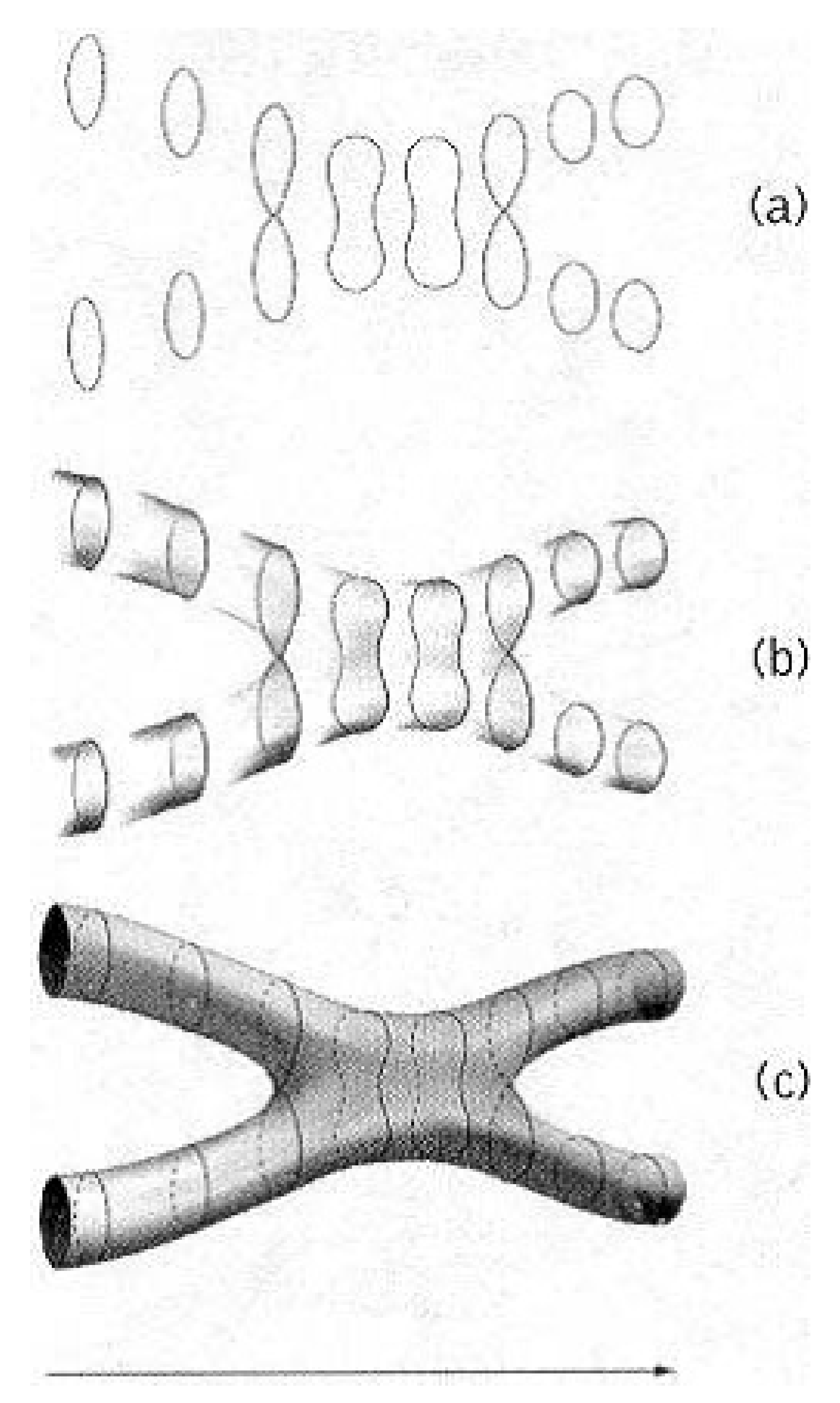


Figura 6.7 (a) Dos cuerdas, en un proceso de colisión, pueden unirse para dar lugar a una tercera cuerda, que posteriormente puede escindirse en dos cuerdas que se desplazan siguiendo trayectorias desviadas (b). El mismo proceso que se representa en (a), enfatizando el movimiento de las cuerdas (c). Una «fotografía de lapso de tiempo» en la que las dos cuerdas que interaccionan barren una «lámina universal».

Sin embargo, existe una diferencia crucial entre las dos descripciones. Hemos de insistir en que la interacción entre partículas puntuales tiene lugar en un punto identificable del espacio y el tiempo, una ubicación con la que pueden estar de acuerdo todos los observadores. Como veremos ahora, esto *no* es cierto en el caso de

interacciones entre cuerdas. Lo explicaremos comparando los modos en que describirían esta interacción George y Gracie, dos observadores que se encuentran en movimiento relativo como se dijo en el capítulo 2. Veremos que sus observaciones no concuerdan en cuanto a dónde y cuándo entran en contacto las dos cuerdas por primera vez.

Para esto, supongamos que estamos mirando la interacción entre dos cuerdas a través de una cámara fotográfica cuyo obturador se mantiene abierto de tal forma que la historia completa de este proceso sea captada en un fragmento de película.[48] El resultado —conocido como *lámina universal de las cuerdas*— se muestra en la Figura 6.7 (c). «Cortando» la lámina universal en trozos paralelos —como se cortan rebanadas en una barra de pan— se puede recuperar la historia de la interacción de las cuerdas en los distintos momentos sucesivos de su existencia. En la Figura 6.8 mostramos un ejemplo de este corte en rebanadas. Concretamente en la Figura 6.8 (a) representamos a George, atentamente centrado en las dos cuerdas que llegan, junto con un plano que corta a través de *todos los sucesos del espacio que se producen al mismo tiempo*, según la perspectiva de George. Como hemos hecho a menudo en capítulos anteriores, en este diagrama hemos suprimido una dimensión espacial para conseguir claridad visual. Por supuesto, en realidad existe para cualquier observador una serie tridimensional de sucesos que se producen al mismo tiempo. Las Figuras 6.8 (b) y 6.8 (c) muestran un par de instantáneas de momentos sucesivos —sucesivas «rebanadas» de la lámina universal— que muestran cómo ve George el acercamiento mutuo de las dos cuerdas. Lo siguiente es de suma importancia: en la Figura 6.8 (c) mostramos el instante en el tiempo, según George, en el que las dos cuerdas entran en contacto por primera vez y se fusionan, produciendo la tercera cuerda.

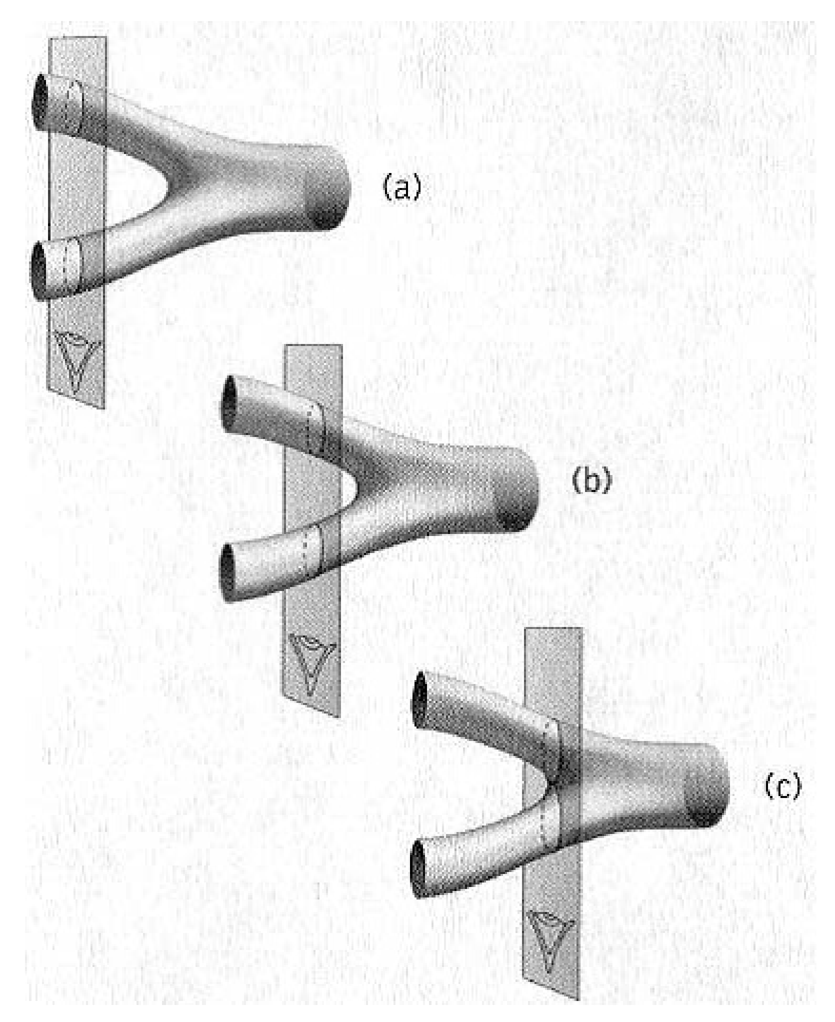


Figura 6.8 Las dos cuerdas entrantes vistas desde la perspectiva de George en tres momentos consecutivos en el tiempo. En (a) y (b) las cuerdas se acercan cada vez más la una a la otra, en (c) se tocan por primera vez, desde la perspectiva de George.

Hagamos ahora lo mismo con Gracie. Como se comentó en el capítulo 2, el movimiento relativo de George y Gracie implica que no coinciden con respecto a cuáles son los sucesos que se producen al mismo tiempo. Desde la perspectiva de Gracie, los sucesos que se producen simultáneamente en el espacio se encuentran en un plano diferente, como se muestra en la Figura 6.9. Es decir, desde la perspectiva de Gracie, la lámina universal de la Figura 6.7 (c) debe ser cortada en trozos con un ángulo diferente para poner de manifiesto la progresión de la interacción en un momento tras otro.

En las Figuras 6.9 (b) y 6.9 (c) mostramos momentos sucesivos en el tiempo, pero ahora lo hacemos desde la perspectiva de Gracie, incluido el momento en que ella ve que las dos cuerdas entran en contacto y producen la tercera cuerda.

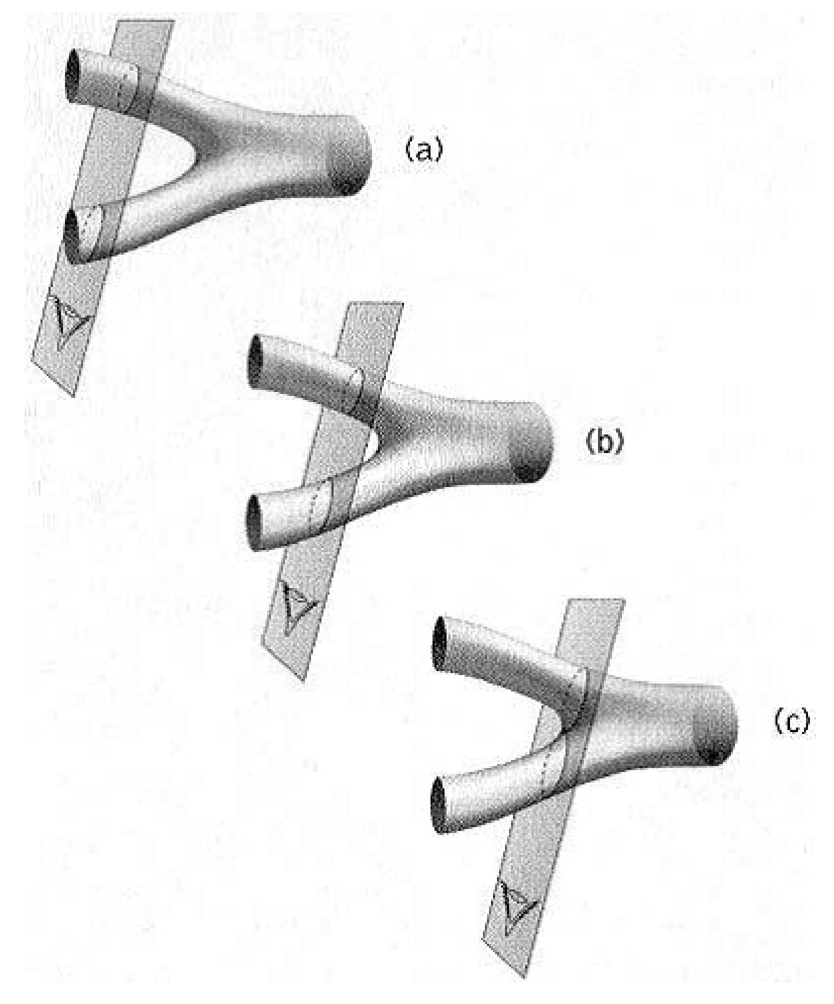


Figura 6.9 Las dos cuerdas entrantes vistas desde la perspectiva de Gracie en tres momentos consecutivos en el tiempo. En (a) y (b) las cuerdas se acercan cada vez más una a la otra; en (c) se tocan por primera vez, desde la perspectiva de Gracie.

Comparando las Figuras 6.8 (c) y 6.9 (c), como hacemos en la Figura 6.10, vemos que George y Gracie no coinciden en cuándo y dónde entran en contacto por primera vez las dos cuerdas iniciales, dónde interaccionan. Dado que una cuerda es un objeto alargado, queda garantizado que *no hay una ubicación inequívoca en el espacio o un momento inequívoco en el tiempo en que las cuerdas interaccionen por primera vez* —más bien depende del estado de movimiento del observador.

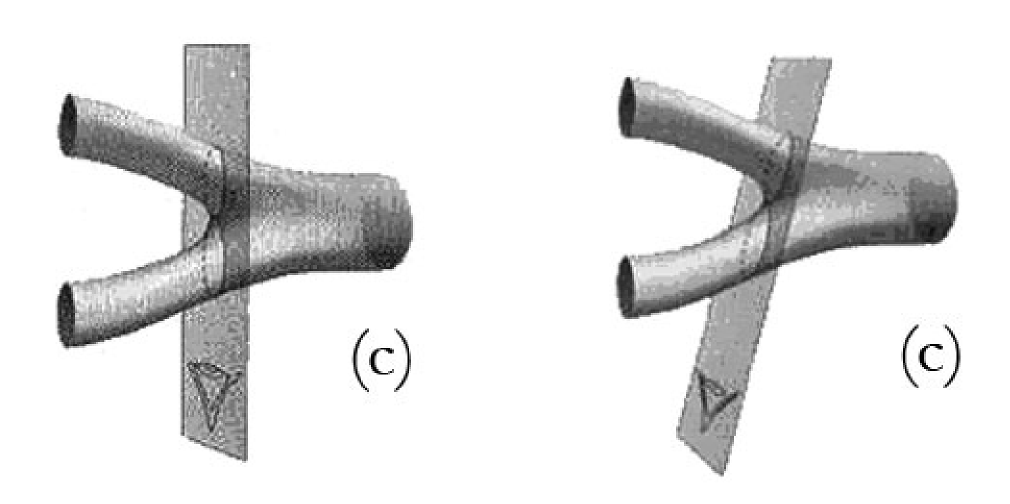


Figura 6.10 George y Gracie no están de acuerdo sobre la posición de la interacción.

Si aplicamos exactamente el mismo razonamiento a la interacción de partículas puntuales, como se resume en la Figura 6.11, volvemos a la conclusión formulada anteriormente: *existe* un punto definido en el espacio y un momento definido en el tiempo donde las partículas puntuales interaccionan. Las partículas puntuales comprimen toda su interacción en un punto definido. Cuando la fuerza que participa en la interacción es la fuerza de la gravedad —es decir, cuando la partícula mensajera que participa en la interacción es el gravitón en vez del fotón— la totalidad del empuje de la fuerza en un solo punto conduce a unos resultados desastrosos, como la cantidad infinita de respuestas que hemos mencionado anteriormente. Por el contrario, las cuerdas «dispersan» el lugar donde se producen las interacciones. El hecho de que distintos observadores perciban que la interacción se produce en lugares diferentes a lo largo de la parte izquierda de la superficie de la Figura 6.10, significa en un sentido real que el lugar de la interacción está disperso entre todos esos lugares. Esto hace que el empuje de la fuerza también se disperse y, en el caso de la fuerza de la gravedad, esta dispersión diluye significativamente sus propiedades ultra microscópicas, tanto que los cálculos dan como resultado una cantidad finita de respuestas bien definidas, en lugar de la cantidad infinita que se obtenía anteriormente. Ésta es una versión más precisa de la dispersión que se daba en la respuesta aproximada que veíamos en la sección anterior. Una vez más, esta dispersión es la causa de un amortiguamiento o alisamiento del temblor ultramicroscópico del espacio cuando las distancias inferiores a la longitud de Planck se difuminan unas con otras.

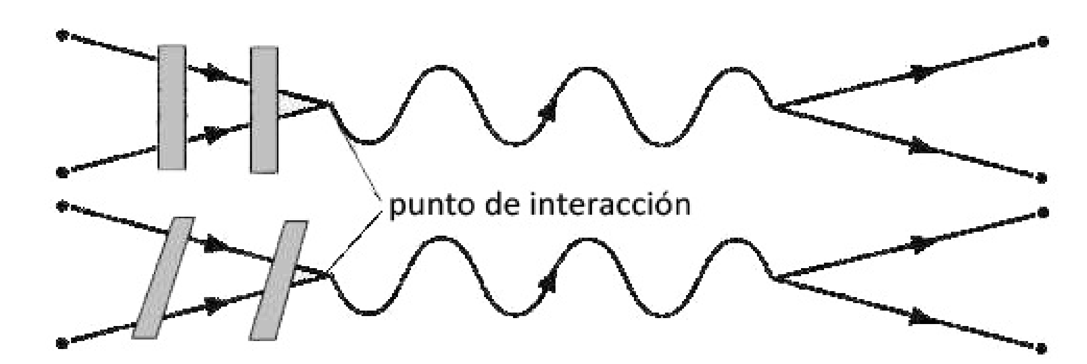


Figura 6.11 Dos observadores en movimiento relativo coinciden en dónde y cuándo interaccionan mutuamente dos partículas puntuales.

Como si el mundo se viera a través de unas lentes que son demasiado débiles o demasiado potentes, los pequeños detalles a una escala inferior a la de Planck que serían accesibles en un sondeo con partículas puntuales, son dispersados conjuntamente por la teoría de cuerdas y se vuelven inocuos. A diferencia del caso en

que la visión es pobre, si la teoría de cuerdas es la descripción definitiva del universo, no existen lentes correctoras que puedan enfocar nítidamente las supuestas fluctuaciones que se producen a una escala inferior a la de Planck. La incompatibilidad de la relatividad general y la mecánica cuántica —que sólo se pone de manifiesto con distancias inferiores a la escala de Planck— se evita en un universo que tenga un límite inferior para las escalas a las que se pueda acceder, o al menos decir que existen, en el sentido convencional. Así es el universo que describe la teoría de cuerdas, en el que vemos que las leyes de lo grande y lo pequeño se pueden fusionar armoniosamente cuando la supuesta catástrofe que surge a distancias ultramicroscópicas se suprime sumariamente.

¿Más allá de las cuerdas?

Las cuerdas son especiales por dos razones. En primer lugar, aunque son alargadas espacialmente, se pueden describir de forma coherente dentro del marco de la mecánica cuántica. En segundo lugar, entre los modelos resonantes de vibración existe uno que tiene las propiedades exactas del gravitón, quedando así garantizado que la fuerza de la gravedad es una parte intrínseca de su estructura. Pero, del mismo modo que la teoría de cuerdas muestra que la idea convencional de partículas puntuales con dimensión cero resulta ser una idealización matemática que no se percibe en el mundo real, ¿podría darse también el caso de que un ramal de cuerda unidimensional infinitamente delgado sea asimismo una idealización matemática? ¿Podría realmente darse el caso de que las cuerdas tuvieran un cierto espesor, como la superficie bidimensional del tubo interior del neumático de una bicicleta o, con un realismo aún mayor, como una delgada rosquilla tridimensional? Las dificultades aparentemente insalvables halladas por Heisenberg, Dirac y otros en sus intentos de construir una teoría cuántica de pepitas tridimensionales han obstaculizado una y otra vez a los investigadores que seguían esta cadena natural de razonamientos.

Sin embargo, bastante inesperadamente, hacia la mitad de la década de 1990, los expertos en teoría de cuerdas constataron, a través de un razonamiento indirecto y bastante retorcido, que tales objetos fundamentales de dimensiones superiores desempeñaban realmente un papel importante y sutil dentro de la propia teoría de cuerdas. Los investigadores han ido constatando gradualmente que la teoría de cuerdas no es una teoría que contenga sólo cuerdas. Una observación de importancia decisiva, fundamental dentro de la segunda revolución de las supercuerdas iniciada por Witten y otros en 1995, es que la teoría de cuerdas incluye en realidad elementos

que tienen toda una variedad de dimensiones diferentes: componentes bidimensionales al estilo del plato de jugar al Frisbee, componentes que son como gotas tridimensionales, y otras posibilidades aún más exóticas a las que dar una patada con la bota. Estos descubrimientos, los más recientes, se comentarán en los capítulos 12 y 13. Por ahora, vamos a continuar siguiendo el sendero de la historia y explorando esas nuevas y chocantes propiedades de un universo constituido por cuerdas unidimensionales en vez de por partículas puntuales de dimensión cero.

Lo «Súper» de las Supercuerdas

Cuando quedó claro el éxito de la expedición de Eddington de 1919 para medir la predicción de Einstein relativa a la desviación que sufre la luz de las estrellas por la acción del Sol, entonces el físico holandés Hendrik Lorentz envió a Einstein un telegrama para darle la buena noticia. Cuando se difundió el mensaje sobre la confirmación de la relatividad general comunicada en dicho telegrama, un estudiante preguntó a Einstein qué habría pensado si el experimento de Eddington no hubiera hallado la desviación predicha de la luz de las estrellas. Einstein respondió: «Entonces lo habría sentido por el querido lord, ya que la teoría es correcta».[49] Por supuesto, si los experimentos realmente no hubieran confirmado las predicciones de Einstein, la teoría de éste no sería correcta y la relatividad general no se hubiera convertido en un pilar de la física moderna. Pero, lo que Einstein quería decir era que la relatividad general describe la gravedad con una elegancia interna tan profunda, con unas ideas tan sencillas, aunque poderosas, que a Einstein le parecía difícil imaginar que la naturaleza pudiera pasarla por alto. La relatividad general, según el punto de vista de Einstein, era demasiado hermosa para ser errónea.

Sin embargo, los juicios estéticos no sirven como árbitros en el discurso científico. En última instancia, las teorías se juzgan por cómo les va cuando son confrontadas con los hechos experimentales duros y fríos. Pero, esta última afirmación está sujeta a una calificación inmensamente importante. Mientras una teoría se construye, su incompleto estado de desarrollo impide con frecuencia asegurar detalladamente sus consecuencias experimentales. No obstante, los físicos han de optar y han de formular juicios sobre la línea de la investigación a la que conviene llevar su teoría parcialmente completa. Algunas de estas decisiones vienen dictadas por la coherencia lógica interna; ciertamente, exigimos que cualquier teoría sensata evite los absurdos lógicos. Otras decisiones están guiadas por una percepción de las implicaciones experimentales cualitativas de una construcción teórica en relación con otra; generalmente no nos sentimos interesados por una teoría si ésta no puede mostrar ningún parecido con lo que encontramos en el mundo real que nos

rodea. Pero ciertamente se da el caso de que algunas decisiones tomadas por los físicos teóricos se basan en un sentido estético, un sentido de cuáles son las teorías que tienen una elegancia y una belleza en sus estructuras y están en correspondencia con el mundo que percibimos. Por supuesto, nada garantiza que esta estrategia conduzca a la verdad. Profundizando en esto, puede ser que el universo tenga una estructura menos elegante que lo que nos han hecho creer nuestras experiencias, o puede ser que lleguemos a la conclusión de que nuestros criterios estéticos actuales necesitan refinarse significativamente cuando se aplican en contextos que nos resultan cada vez menos familiares. Sin embargo, especialmente cuando entramos en una era en la que nuestras teorías describen dominios del universo que son cada vez más difíciles de comprobar experimentalmente, los físicos confían en una estética así para ayudarse a evitar callejones sin salida en los que en otro caso podrían caer. Hasta ahora, este planteamiento ha proporcionado una guía poderosa y llena de perspectivas.

En la física, como en el arte, la simetría es un aspecto clave de la estética. Pero, a diferencia de lo que sucede en el arte, en la física la simetría tiene un significado muy concreto y preciso. De hecho, siguiendo diligentemente esta noción exacta de la simetría hasta sus conclusiones matemáticas, durante las últimas décadas los físicos han encontrado teorías en las que las partículas de la materia y las partículas mensajeras están mucho más estrechamente entrelazadas de lo que cualquiera hubiera podido considerar posible previamente. Estas teorías, que no sólo unifican las fuerzas de la naturaleza, sino también los componentes materiales de ésta, tienen la mayor simetría posible y por esta razón se han llamado *supersimétricas*. La teoría de las supercuerdas, como veremos más adelante, es al mismo tiempo la progenitora y el ejemplo cumbre de un marco supersimétrico.

La naturaleza de las leyes físicas

Imaginemos un universo en el que las leyes de la física sean tan efímeras como las modas, cambiando de un año a otro, de una semana a la siguiente, o incluso de un momento a otro. En un mundo así, suponiendo que estos cambios no interrumpan los procesos básicos de la vida, lo menos que puede suceder es que no nos aburramos ni por un momento. Las acciones más sencillas serían una aventura, ya que las variaciones aleatorias impedirían que cualquiera de nosotros utilizara la experiencia anterior para predecir algo relativo a resultados futuros.

Un universo así es una pesadilla para cualquier físico. Los físicos —y la mayoría

de las demás personas también— se basan fundamentalmente en la estabilidad del universo: las leyes que son ciertas hoy lo eran también ayer y seguirán siéndolo mañana (incluso aunque no hayamos sido lo suficientemente listos como para comprenderlas todas). Después de todo, ¿qué significado podríamos darle a la palabra «ley» si fuera algo que cambia bruscamente? Esto no significa que el universo sea estático; desde luego, el universo cambia de innumerables maneras de un instante al siguiente. Lo que significa es, más bien, que las leyes que gobiernan esta evolución son fijas e invariables. Podría usted preguntar si realmente sabemos que esto es cierto. De hecho, no lo sabemos. Pero nuestro éxito en la descripción de numerosas características del universo, desde un breve momento después del *big bang* hasta el presente, nos garantiza que, si las leyes están cambiando, lo estarán haciendo muy lentamente. La más sencilla suposición que es coherente con todo lo que conocemos es que las leyes son fijas.

Imaginemos ahora un universo en el que las leyes de la física sean tan localistas como la cultura local, cambiando impredeciblemente de un lugar a otro y resistiendo desafiantes cualquier influencia exterior que pudiera uniformizarlas. Como en las aventuras de Gulliver, viajar por este mundo nos expondría a una variedad enormemente rica de experiencias impredecibles. Pero, desde el punto de vista de un físico, ésta es otra pesadilla. Ya es bastante duro, por ejemplo, vivir con el hecho de que las leyes que son válidas en un país —o incluso en un estado— pueden no ser válidas en otro. Pero imaginemos cómo serían las cosas si las leyes de la *naturaleza* fueran así de variadas. En un mundo así, los experimentos realizados en un lugar no tendrían fundamento según las leyes físicas vigentes en otro lugar. Los físicos tendrían que rehacer los experimentos una y otra vez en distintos lugares para comprobar las leyes de la naturaleza que se cumplen en cada lugar. Afortunadamente, todo lo que sabemos apunta a que las leyes de la física son las mismas en todas partes. Todos los experimentos realizados en todo el mundo convergen en el mismo conjunto de explicaciones físicas que los justifican. Además, nuestra capacidad para explicar un gran número de observaciones astrofísicas de remotas regiones del cosmos utilizando un solo conjunto fijo de principios físicos nos lleva a creer que en todos los sitios se cumplen las mismas leyes. No habiendo viajado nunca al extremo opuesto del universo, no podemos descartar definitivamente la posibilidad de que en algún lugar prevalezca un nuevo tipo de física, pero todo apunta a lo contrario.

Una vez más, esto no quiere decir que el universo sea igual —o tenga exactamente las mismas propiedades— en distintos lugares. Un astronauta que vaya montado en un saltador *pogo* en la Luna puede hacer gran cantidad de cosas que son imposibles en la Tierra. Pero, hemos de reconocer que la diferencia se debe a que la Luna tiene mucha menos masa que la Tierra; esto no significa que la ley de la gravedad cambie de alguna manera de un lugar a otro. La ley de la gravedad de

Newton, o más exactamente la de Einstein, es la misma en la Tierra y en la Luna. La diferencia que se da en la experiencia del astronauta es un cambio en las características de su entorno, no una variación de ninguna ley de la física.

Los físicos describen estas dos propiedades de las leyes físicas —que no dependen de dónde y cuándo se utilicen— como *simetrías* de la naturaleza. Con esto, los físicos quieren decir que la naturaleza trata cada momento del tiempo y cada lugar del espacio de manera idéntica —de manera simétrica— garantizando que actúan las mismas leyes fundamentales. De un modo muy parecido a como afectan a las artes plásticas y a la música, estas simetrías son profundamente satisfactorias; indican un orden y una coherencia en el funcionamiento de la naturaleza. La elegancia de los ricos, complejos y diversos fenómenos que surgen a partir de un sencillo conjunto de leyes universales es cuando menos una parte de lo que los físicos expresan cuando invocan la palabra «bello».

En nuestra discusión sobre las teorías de la relatividad especial y general, nos encontramos con otras simetrías de la naturaleza. Recordemos que el principio de la relatividad, que es el núcleo de la relatividad especial, nos dice que todas las leyes físicas deben ser iguales independientemente del movimiento relativo a velocidad constante al que puedan estar sometidos los observadores. Esto es una simetría porque significa que la naturaleza trata a todos estos observadores de manera idéntica, es decir, de manera simétrica. Está justificado que cada observador se considere a sí mismo como un objeto en reposo. Una vez más, no es que los observadores que están en movimiento relativo vayan a realizar observaciones idénticas; como hemos visto anteriormente, en sus observaciones existe todo tipo de *diferencias* asombrosas. Lo que sí es cierto es que, como sucede con las experiencias diferentes de aquel aficionado al saltador *pogo* en la Luna y en la Tierra, las diferencias en la observación reflejan características del entorno —los observadores se encuentran en movimiento relativo— pero, a pesar de estas diferencias, las observaciones están gobernadas por *leyes* idénticas.

Mediante el principio de equivalencia de la relatividad general, Einstein extendió significativamente esta simetría demostrando que las leyes de la física son en realidad idénticas para todos los observadores, incluso cuando están sometidos a movimientos acelerados complicados. Recordemos que Einstein logró esto constatando que un observador con movimiento acelerado está plenamente justificado cuando afirma que se encuentra en reposo y que la fuerza que percibe se debe a un campo gravitatorio. Una vez que la gravedad está incluida en este marco, todos los posibles puntos de observación están en pie de igualdad total. Más allá del atractivo estético que es intrínseco a este tratamiento igualitario de todo movimiento, hemos visto que estos principios de simetría desempeñaban un papel decisivo en las asombrosas conclusiones halladas por Einstein concernientes a la gravedad.

¿Existen otros principios de simetría relacionados con el espacio, el tiempo y el movimiento que las leyes de la naturaleza tengan que respetar? Si piensa usted sobre esto, se le podría ocurrir otra posibilidad más. Las leyes de la física no deberían tener en cuenta el *ángulo* desde el cual se realicen las observaciones. Por ejemplo, si realizamos un experimento y luego decidimos aplicar una rotación a todo el instrumental y volver a hacer el experimento, se cumplirían las mismas leyes. Esto se conoce como simetría de rotación y significa que las leyes de la física tratan de la misma manera todas las *orientaciones* posibles. Se trata de un principio de simetría de la misma categoría que los comentados anteriormente.

¿Existen otras simetrías? ¿Hemos pasado alguna por alto? Se podría sugerir las simetrías de *gauge* (calibración), asociadas con las fuerzas no gravitatorias, como se comentó en el capítulo 5. Éstas son ciertamente simetrías de la naturaleza, pero de tipo más abstracto; aquí nos centramos en simetrías que tienen un vínculo directo con el espacio, el tiempo o el movimiento. Con esta condición, es probable que ya no se nos ocurran más posibilidades. De hecho, en 1967 los físicos Sidney Coleman y Jeffrey Mandula pudieron comprobar que ninguna otra simetría asociada con el espacio, el tiempo o el movimiento podría combinarse con las que acabamos de comentar y dar como resultado una teoría que tuviera algún parecido con nuestro mundo.

Sin embargo, posteriormente, un examen más detenido de este teorema, basado en las ideas de varios físicos, puso de manifiesto precisamente una sutil evasiva: el hallazgo de Coleman y Mandula no utiliza plenamente simetrías sensibles a algo conocido como *espín*.

El espín

Una partícula elemental como, por ejemplo, un electrón puede describir órbitas en torno al núcleo de un átomo de una manera muy parecida al movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Sin embargo, en la descripción tradicional de un electrón como partícula puntual se pondría de manifiesto que no hay analogía con el giro de la Tierra en torno a su eje. Cuando un objeto cualquiera gira, los puntos que están en el eje de rotación —como el *punto central* del disco de jugar al Frisbee— no se mueven. Sin embargo; si algo es realmente como un punto, no tiene «otros puntos» que estén fuera de algún supuesto eje de rotación. Por lo tanto, se podría pensar que sencillamente no existe el concepto de objeto puntual que gire en torno a sí mismo. Hace muchos años, este razonamiento cayó víctima de otra sorpresa de la mecánica

cuántica.

En 1925, los físicos holandeses George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit constataron que una gran cantidad de datos misteriosos relacionados con propiedades de la luz que emiten y absorben los átomos, se podían explicar asumiendo que los electrones tienen unas propiedades *magnéticas* muy particulares. Unos cien años antes, el francés André-Marie Ampere había demostrado que el magnetismo se genera a partir del movimiento de las cargas eléctricas. Uhlenbeck y Goudsmit siguieron estas directrices y descubrieron que sólo un tipo específico de movimiento de electrones podía dar lugar a las propiedades magnéticas que sugerían los datos: el movimiento *rotativo*, es decir, el *espín*. En contra de las expectativas clásicas, Uhlenbeck y Goudsmit proclamaron que, en cierto modo, como la Tierra, los electrones realizaban movimientos de revolución *y* rotación.

Lo dicho por Uhlenbeck y Goudsmit, ¿significaba literalmente que el electrón gira en torno a sí mismo? Sí y no. Lo que su trabajo demostraba realmente es que existe una noción de espín en la mecánica cuántica que en cierto modo es afín a la imagen habitual, pero que en su naturaleza es inherente a la mecánica cuántica. Se trata de una de esas propiedades del mundo microscópico que roza con las ideas clásicas, pero introduce un giro cuántico experimentalmente verificado. Por ejemplo, imaginemos una patinadora que gira sobre sí misma. Cuando recoge sus brazos, gira más rápidamente; cuando los extiende gira más despacio. Y antes o después, dependiendo de la fuerza con que se impulse para girar, lo hará más lentamente y acabará parando. No sucede así con el tipo de giro descubierto por Uhlenbeck y Goudsmit. Según su trabajo y subsiguientes estudios, todo electrón del universo, siempre y sin cesar, *gira a una velocidad fija y que nunca cambia*. El espín de un electrón no es un estado de movimiento transitorio como lo es para otros objetos que nos resultan más familiares y que, por una razón u otra, están girando. Al contrario, el espín de un electrón es una propiedad *intrínseca*, como su masa o su carga eléctrica. Si un electrón no estuviera girando, no sería un electrón.

Aunque los primeros trabajos se centraron en el electrón, los físicos han demostrado posteriormente que estas ideas sobre el espín se pueden aplicar perfectamente a todas las partículas de la materia que forman parte de las tres familias de la Tabla 1.1. Esto es cierto hasta el último detalle: Todas las partículas de la materia (y sus correspondientes antipartículas también) tienen un espín igual al del electrón. En su lenguaje profesional, los físicos dicen que las partículas de la materia tienen todas «espín–½», donde el valor ½ es, por decirlo así, una medida de la mecánica cuántica que expresa la rapidez con que rotan las partículas.[50] Además, los físicos han demostrado que los portadores de fuerzas no gravitatorias —los fotones, los bosones gauge débiles y los gluones— también poseen una característica de rotación intrínseca que resulta ser el *doble* de la de las partículas de la materia. Todos

tienen «espín–1».

¿Qué sucede con la gravedad? Incluso antes de la teoría de cuerdas, los físicos pudieron determinar qué espín debía tener el hipotético gravitón para ser el transmisor de la fuerza de la gravedad. La respuesta era: el doble del espín de los fotones, los bosones gauge débiles y los gluones, es decir, «espín–2».

En el contexto de la teoría de cuerdas, el espín —como la masa y las cargas de fuerza— está asociado con el modelo de vibración que ejecuta una cuerda. Al igual que en el caso de las partículas puntuales, no es del todo correcto pensar que el espín que lleva una cuerda surja del hecho de que ésta literalmente gire en el espacio, pero la imagen es fácil de retener en la mente. De paso, podemos aclarar ahora un tema importante con el que nos habíamos encontrado anteriormente. En 1974, cuando Scherk y Schwarz afirmaron que la teoría de cuerdas se debía considerar como una teoría cuántica que incluía la fuerza de la gravedad, lo formularon así porque habían descubierto que las cuerdas *necesariamente* tienen en su repertorio un patrón vibratorio que *no posee masa y tiene espín–2*, las características determinantes del gravitón. Donde hay un gravitón hay también gravedad.

Después de estas nociones sobre el concepto de espín, pasemos a ver el papel que desempeña para poner de manifiesto la evasiva que encontramos en el trabajo de Coleman y Mandula relativo a las posibles simetrías de la naturaleza, tal como habíamos mencionado en la sección anterior.

Supersimetría y Superparejas

Como hemos recalcado, el concepto de espín, aunque se parece ligeramente a la imagen de un trompo que gira, difiere en aspectos sustanciales de los arraigados en la mecánica cuántica. Su descubrimiento, realizado en 1925, puso de manifiesto que existe otro tipo de movimiento rotatorio que sencillamente no existiría en un universo puramente clásico.

Esto plantea la siguiente pregunta: del mismo modo que un movimiento rotatorio ordinario cumple el principio, asociado a la simetría, de invariancia rotatoria (la física trata todas las orientaciones espaciales de igual manera) ¿podría ser que el movimiento rotatorio más sutil asociado al espín conduzca hacia otra posible simetría de las leyes de la naturaleza? Hacia 1971, aproximadamente, los físicos demostraron que la respuesta a esta pregunta es afirmativa. Aunque la historia completa es bastante complicada, la idea básica es que, cuando se tiene en cuenta el espín, existe precisamente *una simetría más para las leyes de la naturaleza* que es

matemáticamente posible. Se conoce como *supersimetría*[51]

La supersimetría no se puede asociar con un cambio sencillo e intuitivo en el lugar que ocupa el observador; los desplazamientos en el tiempo, los cambios de ubicación espacial, de orientación angular y de la velocidad del movimiento agotan estas posibilidades. Pero, del mismo modo que el espín es «como un movimiento rotatorio, con una peculiaridad relacionada con la mecánica cuántica», la supersimetría se puede asociar con un cambio en el punto de observación en una «extensión de espacio y tiempo dentro de la mecánica cuántica». Estas comillas son especialmente importantes, ya que se supone que la última frase únicamente proporciona un sentido aproximado de dónde encaja la supersimetría en el amplio marco de los principios de simetría.[52] Sin embargo, aunque la explicación del origen de la supersimetría es bastante sutil, nos centraremos en una de sus implicaciones primarias —suponiendo que las leyes de la naturaleza incluyan sus principios— ya que esto es mucho más fácil de comprender.

A principios de la década de 1970, los físicos descubrieron que, si el universo es supersimétrico, las partículas que hay en la naturaleza deben estar formando *pares* cuyos valores de espín respectivos difieren en media unidad. Estos pares de partículas —independientemente de que éstas se consideren puntuales (como en el modelo estándar) o como diminutos bucles vibratorios— se llaman *superparejas*. Dado que las partículas de la materia tienen espín–½, mientras que algunas de las partículas mensajeras tienen espín–1, la supersimetría resulta de un pareado —un emparejamiento— de partículas de materia y de fuerza. De por sí, éste parece un maravilloso concepto unificador. El problema está en los detalles.

Hacia mediados de la década de 1970, cuando los físicos intentaban incorporar la supersimetría al modelo estándar, descubrieron que *ninguna* de las partículas conocidas —las de las Tablas 1.1 y 1.2— podía formar superpareja con ninguna otra. Un análisis teórico detallado demostró que si la supersimetría forma parte del universo, entonces toda partícula conocida debe tener otra partícula como superpareja, aunque esta última sea aún desconocida, y de tal forma que el espín de esta desconocida sea media unidad menos que el de su pareja conocida. Por ejemplo, tendría que existir una partícula de espín–0 que fuera pareja del electrón; a esta partícula hipotética se le ha bautizado con el nombre de *selectron* (una contracción de *supersymmetric electron*, es decir, electrón supersimétrico). Lo mismo se tendría que cumplir también para las otras partículas de la materia: por ejemplo, las hipotéticas superparejas de espín–0 de los neutrinos y los quarks se llamarían *sneutrinos* y *squarks*. De manera similar, las partículas de fuerza deberían tener superparejas de espín–½: para los fotones serían los *photinos*, para los gluones serían los *gluinos*, y para los bosones W y Z estarían los *winos* y los *zinos*.

Así pues, mirando todo esto con mayor detalle, la supersimetría parece ser una

característica terriblemente antieconómica; requiere una enorme cantidad de partículas adicionales que acaban duplicando la lista de componentes fundamentales. Dado que nunca se ha detectado ninguna de las partículas que podrían ser superparejas, estaría justificado retomar la observación de Rabi, mencionada en el capítulo 1, que sobre el descubrimiento del muon iba un paso más allá diciendo «nadie ha pedido una supersimetría» y rechazaba radicalmente este principio de simetría. Sin embargo, existen tres razones por las cuales muchos físicos creen firmemente que desechar la supersimetría está fuera de nuestro alcance y sería bastante prematuro. Veamos estas razones.

La defensa de la supersimetría: antes de la teoría de cuerdas

En primer lugar, desde un punto de vista estético, los físicos consideran difícil creer que la naturaleza respetaría casi todas las simetrías que son matemáticamente posibles, aunque no todas. Desde luego pudiera ser que realmente se estuviera dando una utilización incompleta de la simetría, y eso sería una lástima. Sería como si Bach, después de haber desarrollado numerosas voces entrelazadas para confeccionar un ingenioso modelo de simetría musical, hubiera dejado sin escribir el compás final resolutorio.

La segunda razón es que, incluso dentro del modelo estándar (una teoría que ignora la gravedad), las cuestiones técnicas espinosas que van asociadas a los procesos cuánticos se resuelven rápidamente si la teoría es supersimétrica. El problema básico es que cada tipo diferenciado de partícula realiza su propia contribución al frenesí microscópico de la mecánica cuántica. Los físicos han descubierto que en medio de este frenesí, ciertos procesos en los que participan las interacciones entre partículas siguen siendo coherentes *sólo* si los parámetros numéricos del modelo estándar están finamente calibrados —hasta más de una parte entre mil billones— para anular los efectos cuánticos más perniciosos. Una precisión así sería como ajustar el ángulo con el que se dispara una bala mediante un rifle enormemente poderoso para dar en un objetivo específico situado en la Luna con un margen de error no superior al espesor de una ameba. Aunque algunos ajustes numéricos para lograr una precisión análoga se pueden hacer dentro del modelo estándar, muchos físicos contemplan con bastante recelo una teoría que está construida de una manera tan delicada que falla si un número de la que depende se modifica en el decimoquinto dígito después de la coma.[53]

La supersimetría cambia esto radicalmente porque los *bosones* —partículas cuyo

espín es un número entero (se les dio el nombre por el físico indio Satyendra Bose)— y los *fermiones* —partículas cuyo espín es la mitad de un número entero (impar) (llamadas así en honor al físico italiano Enrico Fermi)— tienden a dar contribuciones que se cancelan según la mecánica cuántica. Como los extremos opuestos de un columpio, cuando los temblores cuánticos de un bosón son positivos los de un fermión tienden a ser negativos, y viceversa. Dado que la supersimetría garantiza que los bosones y los fermiones aparecen formando parejas, desde el principio se producen cancelaciones sustanciales —unas cancelaciones que atenúan significativamente algunos de los frenéticos efectos cuánticos—. Resulta que la coherencia lógica del *modelo estándar supersimétrico* —el modelo estándar al que se han añadido todas las partículas que forman las superparejas— ya no se basa en los ajustes numéricos tan incómodamente delicados del modelo estándar ordinario. Aunque esta es una cuestión muy técnica, muchos expertos en física de partículas consideran que este efecto hace que la supersimetría resulte muy atractiva.

La tercera pieza de evidencia circunstancial para la supersimetría proviene del concepto de *gran unificación*. Una de las características misteriosas de las cuatro fuerzas de la naturaleza es la enorme gama de intensidades de sus fuerzas intrínsecas. La fuerza electromagnética tiene menos de un 1 por 100 de la intensidad de la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil es aproximadamente mil veces más débil, y la fuerza gravitatoria es alrededor de cien mil millones de billones de billones de veces más débil (10^{-35}). Siguiendo el trabajo abrecaminos que mereció al fin el premio Nobel de Glashow, Salam y Weinberg, y que establecía una profunda conexión entre la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil (comentado en el capítulo 5), en 1974 Glashow, junto con Howard Georgi, su colega de Harvard, sugirió la posibilidad de establecer una conexión análoga con la fuerza nuclear fuerte. El trabajo de estos dos últimos, que proponía una «gran unificación» de tres de las cuatro fuerzas, difería de un modo esencial de los planteamientos de la teoría electrodébil: considerando que las fuerzas electromagnética y nuclear débil surgieron a partir de una unión más simétrica cuando la temperatura del universo descendió hasta alrededor de mil billones de grados sobre el cero absoluto (10^{15} grados Kelvin), Georgi y Glashow demostraron que la unión con la fuerza nuclear fuerte habría sido constatable sólo a una temperatura unos diez billones de veces más elevada, alrededor de diez mil billones de billones de grados sobre el cero absoluto (10^{28} grados Kelvin). Desde el punto de vista de la energía, esto es alrededor de mil billones de veces la masa del protón, o aproximadamente cuatro órdenes de magnitud menos que la masa de Planck. Georgi y Glashow llevaron audazmente a la física teórica a un dominio de energía que estaba muchos órdenes de magnitud más allá de lo que nadie se había atrevido a explorar anteriormente.

Un trabajo posterior realizado en Harvard por Georgi, Helen Quinn y Weinberg

en 1974 hizo aún más manifiesta la potencial unidad de las fuerzas no gravitatorias dentro del gran marco unificado. Dado que su contribución sigue desempeñando un papel importante en la unificación de las fuerzas y en la valoración de la importancia de la supersimetría en el mundo natural, vamos a dedicar un momento a explicar este trabajo.

Todos somos conscientes de que la atracción eléctrica entre dos partículas de carga opuesta o la atracción gravitatoria entre dos cuerpos provistos de masa se vuelve más fuerte a medida que la distancia entre los objetos disminuye. Se trata de unas características sencillas y muy conocidas dentro de la física clásica. Sin embargo, surge una sorpresa cuando estudiamos el efecto que la física cuántica tiene en las intensidades de las fuerzas. ¿Por qué ha de tener algún efecto la mecánica cuántica? La respuesta, una vez más, alude a las fluctuaciones cuánticas. Cuando examinamos, por ejemplo, el campo de fuerza eléctrica de un electrón, lo estamos examinando en realidad a través de la «niebla» de las erupciones y aniquilaciones momentáneas de los pares partícula-antipartícula que se producen por toda la región del espacio que rodea a dicho electrón. Hace algún tiempo, los físicos constataron que esta agitada y hormigueante niebla de fluctuaciones microscópicas oscurece toda la intensidad del campo de fuerza del electrón, de un modo parecido a una fina niebla que oscurece parcialmente la luz de un faro. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, a medida que nos acercamos más al electrón, nos introducimos más en la encubridora niebla de pares partícula-antipartícula y por consiguiente estamos menos afectados por su decreciente influencia. Esto implica que la intensidad del campo eléctrico de un electrón *aumentará* a medida que nos acerquemos a él.

Los físicos consideran que este aumento en intensidad según la mecánica cuántica cuando nos acercamos cada vez más al electrón es diferente del aumento conocido dentro de la mecánica clásica, y ponen de manifiesto esta diferencia diciendo que la intensidad *intrínseca* de la fuerza electromagnética aumenta a escalas de distancia menores. Esto indica que la intensidad aumenta, no sólo porque estemos más cerca del electrón, sino también porque se vuelve visible una mayor parte del campo eléctrico intrínseco del electrón. De hecho, aunque nos hemos centrado en el ejemplo del electrón, esta discusión es aplicable asimismo a todas las partículas que poseen carga eléctrica y se resume diciendo que los efectos cuánticos hacen que la intensidad de la fuerza electromagnética aumente cuando se observa a escalas de distancia más cortas.

¿Qué sucede con las otras fuerzas del modelo estándar? ¿Cómo varían sus intensidades intrínsecas con la distancia? En 1973, Gross y Frank Wilczek en Princeton, e independientemente David Politzer en Harvard, estudiaron esta cuestión y hallaron una respuesta sorprendente: la nube cuántica de erupciones y aniquilaciones de partículas *amplifica* las intensidades de las fuerzas nucleares fuerte

y débil. Esto implica que, cuando las examinamos a distancias más reducidas, penetramos más hacia el interior de esta burbujeante nube y por consiguiente estamos menos sometidos a la amplificación que produce. De esta manera, las intensidades de estas fuerzas se hacen *más débiles* cuando se comprueban a distancias más cortas.

Georgi, Quinn y Weinberg tomaron esta constatación y rápidamente llegaron a un final extraordinario. Demostraron que cuando estos efectos del frenesí cuántico se contabilizan minuciosamente, el resultado neto es que las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias tienden a *juntarse*. Dado que las intensidades de estas fuerzas son muy diferentes a las escalas que son accesibles para la tecnología actual, Georgi, Quinn y Weinberg argumentaron que esta diferencia se debe en realidad al efecto diferente que la bruma de la actividad microscópica cuántica tiene sobre cada fuerza. Sus cálculos demostraron que, si se penetra en esta bruma al examinar las fuerzas, no a las escalas habituales que utilizamos en nuestro entorno, sino como ellas actúan, a distancias de aproximadamente una centésima de milésima de billonésima de billonésima (10^{-29}) de centímetro (un mero factor diez mil veces mayor que la longitud de Planck), las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias resultan ser iguales.

Aunque esté muy lejos del dominio de la experiencia común, la elevada cantidad de energía necesaria para percibir distancias tan pequeñas era una característica del universo primitivo turbio y caliente cuando tenía una edad de más o menos una milésima de trillonésima (10^{-39}) de segundo, cuando su temperatura era del orden de 10^{28} grados Kelvin, como se ha mencionado anteriormente. Casi del mismo modo que una colección de ingredientes dispares —trozos de metal, madera, rocas, minerales, etc.— se fusionan unos con otros y se convierten en un plasma homogéneo y uniforme cuando se calientan a una temperatura suficientemente alta, estos trabajos teóricos sugieren que la fuerza electromagnética y las fuerzas nucleares fuerte y débil se fusionan todas ellas a unas temperaturas inmensas para dar una única y gran fuerza. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 7.1.[54]

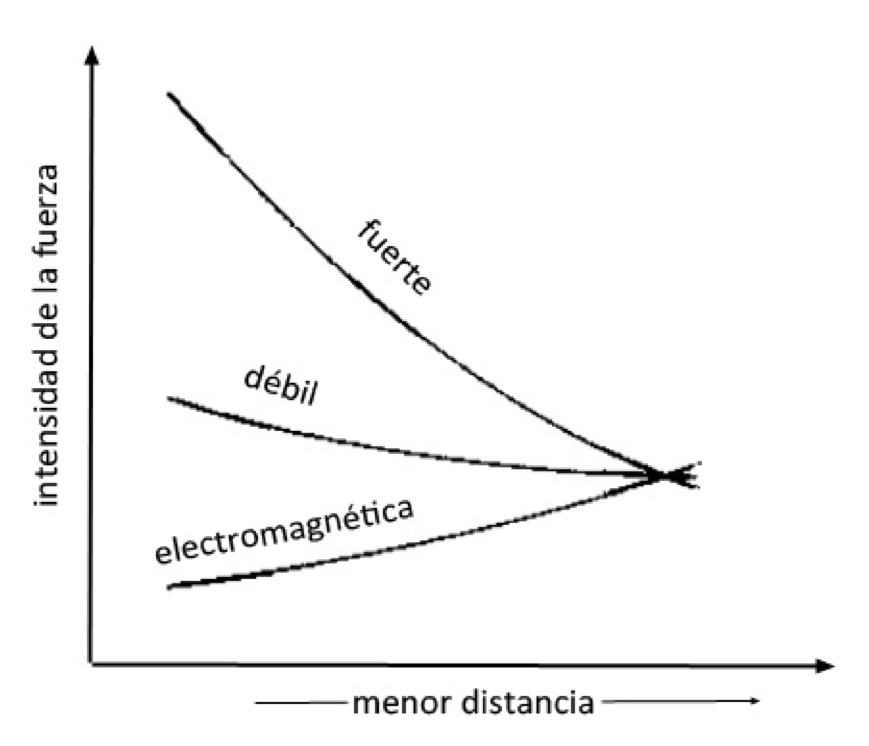


Figura 7.1 Las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias cuando operan a escalas de distancias cada vez más cortas o, lo que es equivalente, cuando actúan sobre procesos de energía cada vez mayor.

Aunque no disponemos de la tecnología necesaria para sondear escalas de distancia tan diminutas o para producir unas temperaturas tan abrasadoras, desde 1974 los experimentadores han refinado significativamente las mediciones de las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias en unas condiciones habituales normales. Estos datos —los puntos de partida para las curvas de intensidad de las tres fuerzas en la Figura 7.1— son los que se utilizaron para las extrapolaciones mecánico-cuánticas realizadas por Georgi, Quinn y Weinberg. En 1991, Ugo Amaldi del CERN, Wim de Boer y Hermann Fürstenau de la Universidad de Karlsruhe, en Alemania, rehicieron los cálculos de las extrapolaciones de Georgi, Quinn y Weinberg utilizando estos refinamientos experimentales y demostraron dos hechos significativos. En primer lugar, las intensidades de las tres fuerzas no gravitatorias *casi coincidían, pero no del todo* a escalas de distancias pequeñísimas (por consiguiente, alta energía/alta temperatura), como se muestra en la Figura 7.2.

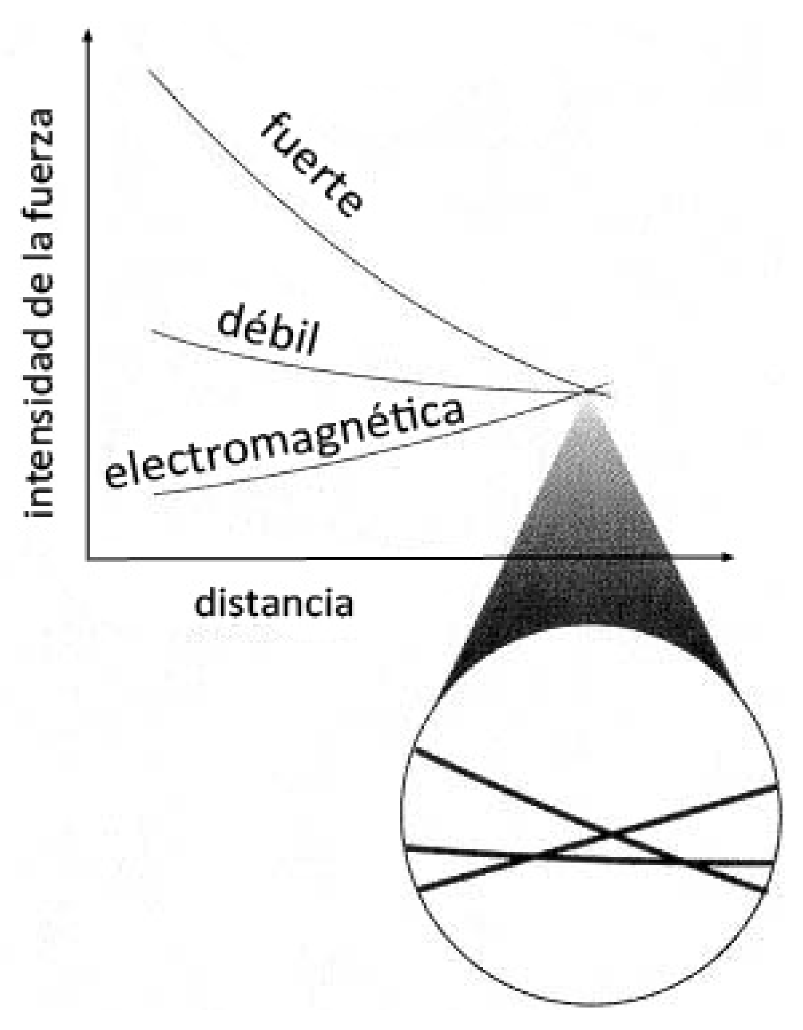


Figura 7.2 Un refinamiento en el cálculo de las intensidades de las fuerzas pone de manifiesto que sin la supersimetría casi llegan a coincidir, pero no lo hacen.

En segundo lugar, esta pequeñísima, pero innegable, discrepancia en sus intensidades *desaparece* si se incorpora la supersimetría. La razón es que las nuevas partículas llamadas superparejas que exige la supersimetría contribuyen a crear fluctuaciones cuánticas adicionales, y estas fluctuaciones son precisamente lo que hace falta para dar un codazo suave a las intensidades de las fuerzas, de tal manera que converjan unas con otras.

Para muchos físicos, es extremadamente difícil creer que la naturaleza elija las fuerzas de tal modo que tengan unas intensidades que *casi*, pero no del todo, se unifican microscópicamente —es decir, microscópicamente llegan a ser iguales—. Es como poner juntas las piezas de un puzle en el que la última pieza es ligeramente imperfecta, por lo que no encajará limpiamente en la posición que le corresponde. La supersimetría diestramente refina su forma de tal modo que todas las piezas ajustan con firmeza en su lugar.

Otro aspecto de esta última constatación es que proporciona una posible respuesta a la pregunta: ¿por qué no hemos descubierto ninguna de estas partículas llamadas superparejas? Los cálculos que llevan a la convergencia de las intensidades de las fuerzas, así como otras consideraciones estudiadas por algunos físicos, indican que

las superparejas deben ser bastante más pesadas que las partículas conocidas. Aunque no se puede hacer predicciones definitivas, algunos estudios indican que las superparejas podrían tener mil veces más masa que un protón, o quizá sean aún más pesadas. El hecho de que nuestros más modernos aceleradores de partículas aún no puedan conseguir tales energías aporta una explicación de la causa por la cual estas partículas no se han descubierto por ahora. En el capítulo 9, volveremos a una discusión sobre las expectativas para determinar experimentalmente en un futuro cercano si la supersimetría es verdaderamente una propiedad de nuestro mundo.

Por supuesto, las razones que hemos dado para creer en la supersimetría —o, al menos, no descartar su existencia— están lejos de ser irrefutables. Hemos explicado cómo la supersimetría eleva nuestras teorías a su forma más simétrica, pero alguien podría decir que el universo no tiene ningún interés por alcanzar la forma más simétrica que sea matemáticamente posible. Hemos destacado como una importante cuestión técnica que la supersimetría nos libra de la delicada tarea de ajustar los parámetros numéricos en el modelo estándar para evitar sutiles problemas cuánticos, pero se podría alegar que la verdadera teoría que describa algún día la naturaleza podría muy probablemente atravesar el estrecho límite existente entre la autoconsistencia y la autodestrucción. Hemos comentado de qué modo la supersimetría modifica las intensidades intrínsecas de las tres fuerzas no gravitatorias a distancias muy pequeñas justo de la manera adecuada para que se fusionen en una gran fuerza unificada —pero, una vez más, se podría alegar que nada en el diseño de la naturaleza exige que estas intensidades de las fuerzas deban coincidir de manera exacta a escalas microscópicas—. Finalmente, también se podría argumentar que una explicación más sencilla de por qué nunca se han encontrado las partículas llamadas superparejas es que nuestro universo no es supersimétrico y, por consiguiente, las superparejas no existen.

Nadie puede refutar ninguna de estas respuestas. Sin embargo, la posición defensora de la supersimetría se refuerza enormemente cuando consideramos el papel que desempeña esta simetría en la teoría de cuerdas.

La Supersimetría en la teoría de cuerdas

La teoría de cuerdas original que surgió a partir de los trabajos de Veneziano a finales de la década de 1960 incluía todas las simetrías que hemos comentado al principio de este capítulo, pero no incluía la supersimetría (que no se había descubierto todavía). Esta primera teoría basada en el concepto de cuerda se llamaba concretamente la

teoría de cuerdas bosónicas. La palabra *bosónica* indica que todos los patrones vibratorios de la cuerda bosónica tienen valores de espín que son números enteros —no existen patrones fermiónicos, es decir, no hay patrones cuyos valores de espín difieran de un número entero en media unidad—. Esto originó dos problemas.

Primero, si la teoría de cuerdas tenía que describir todo tipo de fuerzas y todo tipo de materia, de algún modo tendría que incluir patrones vibratorios fermiónicos, ya que las partículas de materia conocidas tienen todas espín–½. El segundo problema, mucho más preocupante, era la constatación de que había un patrón de vibración en la teoría de cuerdas bosónicas cuya masa (más precisamente, el cuadrado de su masa) era *negativa*: el llamado *taquión*. Incluso antes de aparecer la teoría de cuerdas, algunos físicos habían estudiado la posibilidad de que nuestro universo pudiera contener taquiones, además de las partículas más conocidas que tienen todas ellas masas positivas, pero mediante sus esfuerzos demostraron que es difícil, si no imposible, para una teoría así ser lógicamente sensata. De un modo similar, en el contexto de la teoría de cuerdas bosónicas, los físicos intentaron todo tipo de piruetas para comprender el sentido de la extraña predicción relativa al patrón vibratorio del taquión, pero fue en vano. Todo esto fue dejando cada vez más claro que, aunque se trataba de una teoría interesante, a la cuerda bosónica le faltaba algo esencial.

En 1971, Pierre Ramond, de la Universidad de Florida, aceptó el desafío de modificar la teoría de cuerdas bosónicas para incluir patrones vibratorios fermiónicos. Mediante su trabajo y otros resultados subsiguientes de Schwarz y André Neveu, comenzó a surgir una nueva versión de la teoría de cuerdas. Ante la sorpresa de todos, resultó que los patrones de vibración bosónicos y fermiónicos de esta nueva teoría parecían venir en pares. Por cada patrón bosónico había un patrón fermiónico y viceversa. En 1977, con las ideas de Ferdinando Gliozzi de la Universidad de Turín, Scherk, y David Olive del *Imperial College* surgió una explicación adecuada de este emparejamiento. La nueva teoría de cuerdas incluía la supersimetría, y el emparejamiento que se observaba de patrones vibratorios bosónicos y fermiónicos reflejaba este carácter altamente simétrico. La teoría de cuerdas supersimétrica —es decir, la teoría de supercuerdas— había nacido. Además, la obra de Gliozzi, Scherk y Olive tuvo otro resultado crucial: demostraban que la problemática vibración del taquión en la teoría de las cuerdas bosónicas no afecta a la supercuerda. Lentamente, las piezas del rompecabezas de las cuerdas iban encajando cada una en su sitio.

Sin embargo, el importante impacto inicial de la obra de Ramond, y también de Neveu y Schwarz, no se produjo realmente en la teoría de cuerdas. En 1973, los físicos Julius Wess y Bruno Zumino constataron que la supersimetría —la nueva simetría que surgía de la reformulación de la teoría de cuerdas— era también aplicable a teorías basadas en partículas puntuales. Rápidamente empezaron a dar pasos agigantados hacia la incorporación de la supersimetría en el marco de la teoría

cuántica de campos con partículas puntuales. A partir de entonces, en aquellos tiempos, la teoría cuántica de campos fue el afán más importante de la elite de la comunidad física de partículas —la teoría de cuerdas se volvía cada vez más un tema al margen—. Las ideas de Wess y Zumino pusieron en marcha una enorme cantidad de investigaciones posteriores sobre lo que se ha llegado a llamar *teoría de campos cuánticos supersimétrica*. El modelo estándar supersimétrico, que ya comentamos en la sección anterior, es uno de los logros teóricos principales de estas investigaciones; ahora vemos que, a través de vueltas y giros históricos, incluso esta teoría de las partículas puntuales tiene una gran deuda contraída con la teoría de cuerdas.

Con el resurgimiento de la teoría de las supercuerdas a mediados de la década de 1980, la supersimetría ha vuelto a emerger en el contexto en que fue descubierta originalmente. En este marco, la defensa de la supersimetría va mucho más allá de lo presentado en la sección anterior. La teoría de cuerdas es la única vía que conocemos para realizar la fusión de la relatividad general y la mecánica cuántica. Pero solamente la versión supersimétrica de la teoría de cuerdas evita el pernicioso problema del taquión y, además, posee patrones vibratorios fermiónicos que pueden explicar las partículas de materia que forman nuestro entorno. Por lo tanto, la supersimetría va a la par con la propuesta que plantea la teoría de cuerdas en relación con una teoría cuántica de la gravedad, así como con su gran aspiración de unificar todas las fuerzas y toda la materia. Si la teoría de cuerdas es correcta, los físicos esperan que también lo sea la supersimetría.

Sin embargo, hasta mediados de la década de 1990, una cuestión especialmente preocupante afectaba a la teoría supersimétrica de cuerdas.

Un Súper embarazo de riquezas

Si alguien le dice que ha resuelto el misterio del destino de Amelia Earhart (famosa aviadora cuyo aeroplano desapareció misteriosamente en 1937, cuando sobrevolaba el océano Pacífico), puede que usted se sienta escéptico al principio, pero si le presentan una explicación bien documentada y minuciosamente meditada, probablemente les escuche y, quién sabe, hasta podrían incluso convencerle. Pero ¿qué pasaría si a continuación le dicen que en realidad tienen también una segunda explicación? Usted les escucha pacientemente y se sorprende al descubrir que la explicación alternativa está igual de bien documentada y meditada que la primera. Luego, después de terminar la segunda explicación, le presentan una tercera, una cuarta e incluso una quinta explicación —cada una de ellas diferente de las otras,

pero igual de convincente—. Sin duda, al final de esta experiencia, usted no se sentirá más cerca de conocer el auténtico destino de Amelia Earhart que al principio. En el terreno de las explicaciones fundamentales, dar de más significa definitivamente dar menos.

En 1985, la teoría de cuerdas —a pesar de la justificada expectación que estaba generando— empezaba a sonar como nuestro excesivamente prolífico experto en los asuntos de Amelia Earhart. La razón de esto es que en 1985 algunos físicos constataron que la supersimetría, que entonces era un elemento central en la estructura de la teoría de cuerdas, realmente podía incorporarse a dicha teoría, no de una sola manera, sino de *cinco* maneras diferentes. Cada método produce un emparejamiento de patrones vibratorios bosónicos y fermiónicos, pero los detalles de este emparejamiento, así como gran número de propiedades de las teorías resultantes, difieren sustancialmente. Aunque sus nombres no son todos ellos tan importantes, vale la pena recordar que esas cinco teorías supersimétricas se llaman la *Teoría Tipo I*, la *Teoría Tipo IIA*, la *Teoría Tipo IIB*, la *Teoría Tipo Heterótico O(32)* (que se pronuncia «o-treinta y dos»), y la *Teoría Tipo Heterótico* $E_8 \times E_8$ (que se pronuncia «e sub ocho por e sub ocho»). Todas las características de la teoría de cuerdas que hemos discutido hasta este momento son válidas para cada una de estas teorías; sólo difieren en los detalles más pequeños.

El hecho de tener cinco versiones diferentes de lo que supuestamente es la teoría del todo (T.O.E.: *theory of everything*) —posiblemente la teoría unificada definitiva — causó bastante confusión entre los expertos en teoría de cuerdas. Del mismo modo que sólo existe una explicación verdadera para lo que le haya sucedido a Amelia Earhart (la encontremos o no), esperamos que exista una única versión verdadera para la explicación más profunda y fundamental del funcionamiento del mundo. Vivimos en un solo universo, por lo tanto esperamos una sola explicación.

Una sugerencia para resolver este problema podría ser que, aunque existan cinco teorías diferentes de las supercuerdas, cuatro podrían quizá ser descartadas por la vía experimental, con lo que quedaría un único marco relevante para la explicación. Sin embargo, incluso si fuera el caso, nos quedaría aún esa molesta pregunta sobre cuál es la razón por la que existen las otras teorías. Como dijo Witten, con bastante ironía: «Si sólo una de las teorías describe nuestro universo, ¿quién vive en los otros cuatro?»[55] El sueño del físico es que la búsqueda de las respuestas definitivas conduzca a una conclusión única y absolutamente inevitable. Lo ideal es que la teoría final —ya se trate de la teoría de cuerdas o de alguna otra— sea de un modo determinado, sencillamente porque no haya otra posibilidad. Muchos piensan que, si descubriéramos que existe una única teoría lógicamente sólida que incluye los ingredientes básicos de la relatividad y de la mecánica cuántica, habríamos logrado la explicación más profunda de por qué el universo tiene las propiedades que tiene.

Resumiendo, sería el paraíso de la teoría unificada.[56]

Como veremos en el capítulo 12, las investigaciones más recientes han dado un paso gigantesco para acercar la teoría de las supercuerdas a esta utopía unificada demostrando que las cinco teorías diferentes son en realidad cinco modos diferentes de describir *una y sólo una teoría global*. La teoría de las supercuerdas es la única que *tiene* un buen árbol genealógico.

Parece que las cosas van encajando, pero, como veremos en el próximo capítulo, la unificación a través de la teoría de cuerdas requiere un punto de partida más significativo desde los conocimientos convencionales.

Más dimensiones de las que conocen los ojos

Einstein resolvió dos de los conflictos científicos importantes de los últimos cien años mediante la relatividad especial y la relatividad general. Aunque los problemas iniciales que motivaron su obra no presagiaban los resultados, cada una de estas resoluciones transformaron completamente nuestro modo de conocer el espacio y el tiempo. La teoría de cuerdas resuelve el tercer conflicto científico importante del siglo pasado y, de una manera que incluso Einstein habría considerado extraordinaria, requiere que sometamos nuestros conceptos de espacio y tiempo, de nuevo, a otra revisión radical. La teoría de cuerdas sacude de pies a cabeza los fundamentos de la física moderna, hasta tal punto que incluso el número de dimensiones aceptado hasta ahora para nuestro universo —algo tan básico que se podría pensar que estaba más allá de todo cuestionamiento— se viene abajo de un modo radical y, al mismo tiempo, convincente.

La ilusión de lo familiar

La experiencia es fuente de inspiración para la intuición. Pero hace más que eso: la experiencia establece el marco dentro del cual analizamos e interpretamos lo que percibimos. Sin duda, usted esperaría, por ejemplo, que el «niño salvaje» educado por una manada de lobos interpretara el mundo desde una perspectiva que diferiría sustancialmente de la que usted pueda tener. También otras comparaciones menos extremas, como las que se puede hacer entre personas educadas en tradiciones culturales muy diferentes, sirven para recalcar hasta qué punto nuestras experiencias determinan nuestro universo mental interpretativo.

Sin embargo, hay ciertas cosas que *todos* experimentamos. Y son a menudo las creencias y las expectativas que se derivan de estas experiencias universales las que pueden ser más difíciles de identificar y de poner en tela de juicio. Un ejemplo

sencillo, pero profundo, es el siguiente. Si usted deja de leer este libro y se levanta, puede moverse en tres direcciones independientes —es decir, a través de tres dimensiones espaciales independientes—. Cualquier camino que siga —independientemente de lo complicado que sea— es la resultante de alguna combinación de movimientos a través de lo que podríamos llamar la «dimensión izquierda-derecha», la «dimensión adelante-atrás» y la «dimensión arriba-abajo». Cada vez que da usted un paso, implícitamente hace tres elecciones separadas que determinan cómo se mueve a través de estas tres dimensiones.

Una afirmación equivalente, como la que se puede encontrar en nuestra discusión sobre la relatividad especial, es que cualquier ubicación en el universo se puede especificar con exactitud dando tres datos, es decir, la posición que ocupa con respecto a estas tres dimensiones espaciales. En el lenguaje habitual, se puede especificar una dirección en una ciudad, por ejemplo, dando una calle (ubicación en la «dimensión izquierda-derecha»), una calle o avenida perpendicular (la ubicación en la «dimensión adelante-atrás») y el número del piso (la ubicación en la «dimensión arriba-abajo»). Y desde una perspectiva más moderna, hemos visto que la obra de Einstein nos induce a pensar en el tiempo considerándolo como otra dimensión (la «dimensión futuro-pasado»), dándonos un total de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal). Los sucesos del universo se especifican diciendo dónde y cuándo se producen.

Esta característica del universo es tan básica, tan coherente y tan perfectamente penetrante que parece estar realmente más allá de todo cuestionamiento. En 1919, sin embargo, un matemático polaco poco conocido llamado Theodor Kaluza, de la Universidad de Konigsberg, tuvo la temeridad de desafiar lo que se consideraba obvio —sugirió que el universo no podía en realidad tener tres dimensiones espaciales; podía tener más—. A veces algunas sugerencias que parecen insensatas lo son completamente. Pero a veces hacen temblar los cimientos de la física. Aunque tardó bastante tiempo en infiltrarse, la sugerencia de Kaluza ha revolucionado nuestra formulación de las leyes físicas. Aún estamos sintiendo los efectos sísmicos de la idea, asombrosamente presciente, de este matemático.

La idea de Kaluza y el refinamiento de Klein

La idea de que nuestro universo pudiera tener más de tres dimensiones espaciales suena fatua, rara o mística. En realidad, es sin embargo concreta y totalmente plausible. Para ver esto, lo más fácil es dejar por un momento de pensar en el

universo global y centrarnos en un objeto más familiar, como una larga y estrecha manguera de jardinería.

Supongamos que extendemos la manguera unos cien metros atravesando un barranco y la contemplamos, por ejemplo, desde algo más de kilómetro y medio de distancia, como se ve en la Figura 8.1(a). Desde esta distancia, percibiremos fácilmente la larga extensión horizontal de la manguera desplegada, pero a menos que se tenga una extraña capacidad visual, el *grosor* de la manguera será difícil de discernir. Desde nuestro distante punto de observación, pensaremos que, si una hormiga tuviera que vivir dentro de la manguera, podría caminar sólo a lo largo de *una* dimensión: la dimensión izquierda-derecha recorriendo la longitud de la manguera. Si alguien nos pidiera que especificáramos dónde estaba la hormiga en un momento determinado, sólo tendríamos que mencionar *un* dato: la distancia a la que se encontraba con respecto al extremo izquierdo (o derecho) de la manguera. La cuestión es que desde una distancia de, más o menos, kilómetro y medio, un largo trozo de manguera parece un objeto unidimensional.

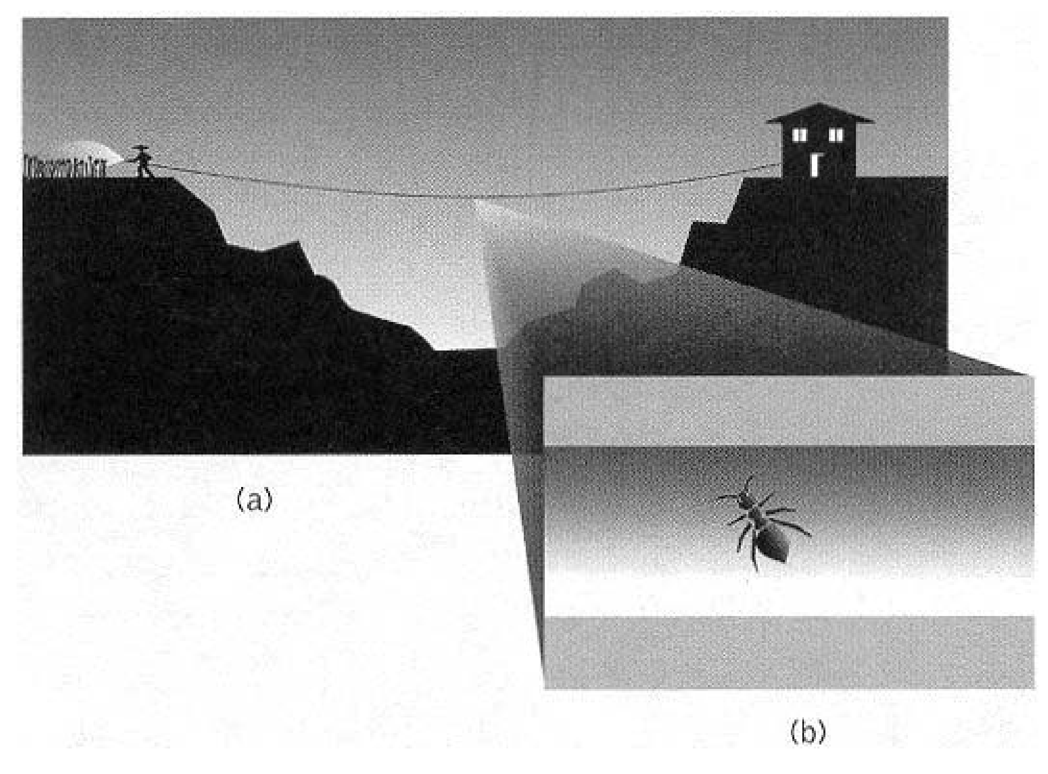


Figura 8.1 (a) Una manguera de riego vista desde una distancia considerable parece un objeto unidimensional. (b) Cuando se amplía, se hace visible una segunda dimensión, una dimensión que tiene forma de círculo y está arrollada en torno a la manguera.

En realidad, sabemos que la manguera *tiene* grosor. Podría resultar problemático determinarlo desde una distancia de cuatrocientos metros, pero utilizando unos prismáticos se puede aproximar la visión de la manguera y observar directamente su anchura, como se muestra en la Figura 8.1 (b). Desde esta perspectiva ampliada, se ve que una pequeña hormiga que viva en la manguera tiene en realidad *dos* direcciones

independientes por las que puede caminar: como ya se había visto, a lo largo de la dimensión izquierda-derecha, recorriendo la longitud de la manguera, *y* además alrededor de la sección circular de la manguera, recorriendo la «dimensión en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario a las agujas del reloj». Ahora nos damos cuenta de que, para especificar dónde está la diminuta hormiga en un instante dado, en realidad debemos dar *dos* datos: dónde está la hormiga en relación con la longitud de la manguera, y dónde está en torno a la sección circular. Esto pone de manifiesto el hecho de que la superficie de la manguera es bidimensional.[57]

No obstante, hay una clara diferencia entre estas dos dimensiones. La dirección que recorre la longitud de la manguera es larga y fácilmente visible. La dirección que circunda el grosor de la manguera es corta, «arrollada» y difícil de ver. Para percibir la dimensión circular, hay que examinar la manguera con una precisión significativamente mayor.

Este ejemplo, pone de manifiesto una característica sutil e importante de las dimensiones espaciales: se presentan en dos variedades. Pueden ser amplias, extendidas y por consiguiente directamente perceptibles, o pueden ser pequeñas, arrolladas y mucho más difíciles de percibir. Por supuesto, en este ejemplo no se ha de hacer un gran esfuerzo para poner de manifiesto la dimensión «arrollada» que circunda el grosor de la manguera. Basta con usar unos prismáticos. Sin embargo, si tuviéramos una manguera muy delgada —tan delgada como un cabello o un vaso capilar— sería más difícil detectar su dimensión arrollada.

En un artículo que envió a Einstein en 1919, Kaluza hacía una sugerencia asombrosa. Planteaba que la estructura espacial del universo podría tener más dimensiones además de las tres conocidas a través de la experiencia corriente. La motivación para plantear esta tesis radical, como explicaremos enseguida, fue la constatación realizada por Kaluza de que dicha tesis proporcionaba un marco elegante y exigente para entretejer la relatividad general de Einstein y la teoría electromagnética de Maxwell y dar como resultado un marco contextual único y unificado. Pero, yendo a lo inmediato, ¿cómo puede compaginarse esta propuesta con el hecho aparente de que *vemos* exactamente tres dimensiones espaciales?

La respuesta, implícita en el trabajo de Kaluza y posteriormente expresada de forma explícita y refinada por el matemático sueco Oskar Klein en 1926, es que *la estructura espacial de nuestro universo puede tener tanto dimensiones extendidas como dimensiones arrolladas*. Es exactamente igual que el alargamiento horizontal de la manguera, nuestro universo tiene dimensiones que son amplias, extendidas y fácilmente visibles —las tres dimensiones espaciales de nuestra experiencia habitual —. Pero, como el grosor circular de una manguera, el universo también puede tener dimensiones espaciales adicionales que están estrechamente arrolladas en un espacio diminuto —un espacio tan pequeño que hasta ahora ha evitado que lo detectemos

incluso utilizando nuestros instrumentos mentales más sofisticados.

Para conseguir una imagen clara de esta extraordinaria proposición, reconsideremos por un momento la manguera del jardín. Supongamos que la manguera está pintada con unos círculos negros muy próximos unos a otros a lo largo de todo su contorno. Desde lejos, como antes, la manguera parece una línea delgada unidimensional. Pero si nos acercamos con los prismáticos, podemos detectar la dimensión arrollada aún más fácilmente gracias a los círculos pintados, como se ve en la imagen de la Figura 8.2.

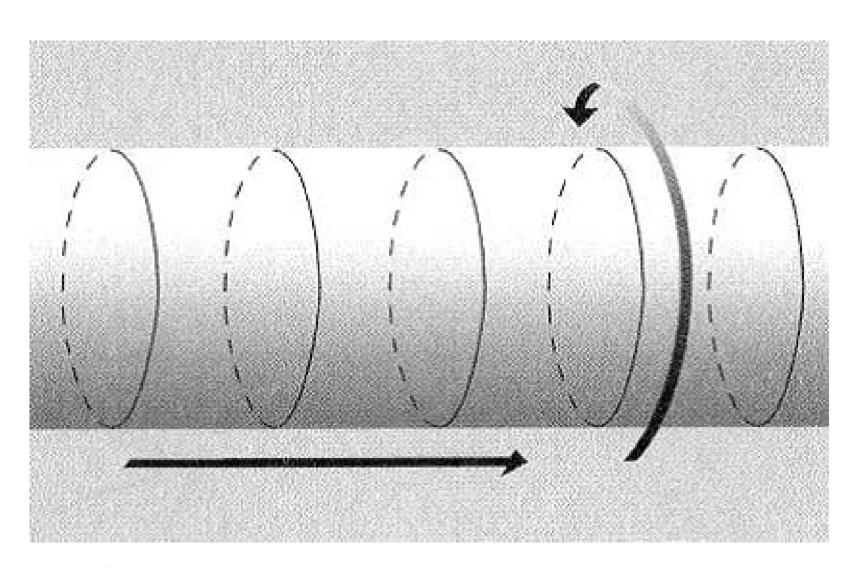


Figura 8.2 La superficie de la manguera de jardín es bidimensional: una dimensión (su extensión horizontal), enfatizada por la flecha recta, es larga y extensa; la otra dimensión (su contorno circular), enfatizado con la flecha circular, es corta y enrollada.

Esta figura realza el hecho de que la superficie de la manguera de jardín es bidimensional, con una dimensión amplia y extendida, y otra pequeña y circular. Kaluza y Klein plantearon como propuesta que nuestro universo espacial es similar, pero tiene tres dimensiones espaciales amplias y extendidas, y una dimensión pequeña y circular, sumando un total de cuatro dimensiones espaciales. Es difícil dibujar algo que tenga tantas dimensiones, por lo que a efectos de visualización debemos optar por una ilustración que incorpore dos dimensiones largas y una dimensión pequeña y circular. Ilustramos esto en la Figura 8.3, en la que magnificamos la estructura del espacio de un modo muy parecido a lo que hacíamos al acercar a un primer plano la superficie de la manguera.

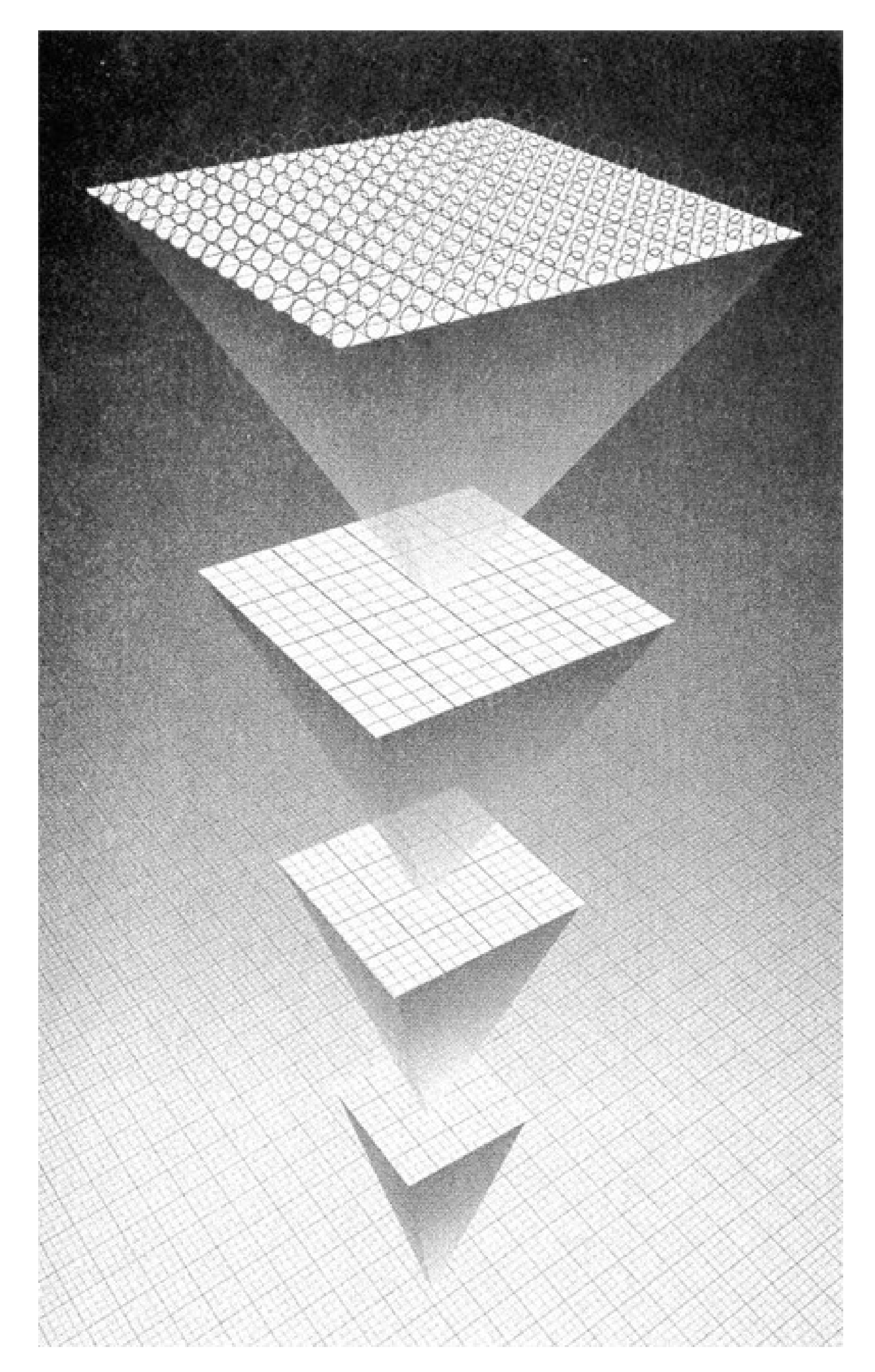


Figura 8.3 Como en la Figura 5.1, cada nivel va representando sucesivamente una mayor magnificación de la estructura espacial representada en el nivel anterior. Nuestro universo puede tener dimensiones adicionales —como vemos en el cuarto nivel de magnificación— siempre que estén arrolladas en un espacio lo suficientemente pequeño como para haber eludido hasta ahora su detección directa.

La imagen inferior de la figura muestra la estructura aparente del espacio —el mundo corriente que nos rodea— a escalas de distancia habituales, por ejemplo en metros. Estas distancias se representan mediante el conjunto más grande de líneas en grilla. En las imágenes siguientes, acercamos al primer plano la estructura del espacio, centrando nuestra atención en regiones de tamaño cada vez menor, que magnificamos secuencialmente con el fin de hacerlas fácilmente visibles. Al principio, cuando examinamos la estructura del espacio a escalas de distancia más

cortas, no sucede gran cosa; parece mantener la misma forma básica que tiene a escalas más amplias, como vemos en los tres primeros niveles de ampliación. Sin embargo, si continuamos nuestro viaje hasta el examen más microscópico del espacio —el cuarto nivel de ampliación en la Figura 8.3— se pone de manifiesto una nueva dimensión arrollada y circular, muy parecida a los hilos circulares que configuran el pelo de un trozo de alfombra tejida de una forma muy apretada. Kaluza y Klein sugirieron que la nueva dimensión circular existe en *todos* los puntos de las dimensiones extendidas, al igual que el grosor circular de la manguera existe en todos los puntos a lo largo de su longitud horizontal cuando está extendida. (Para que resulte visible con mayor claridad, hemos dibujado sólo una muestra ilustrativa de la dimensión circular en puntos espaciados regularmente en las dimensiones extendidas). En la Figura 8.4 mostramos un primer plano de la visión que dieron Kaluza y Klein de la estructura microscópica del espacio.

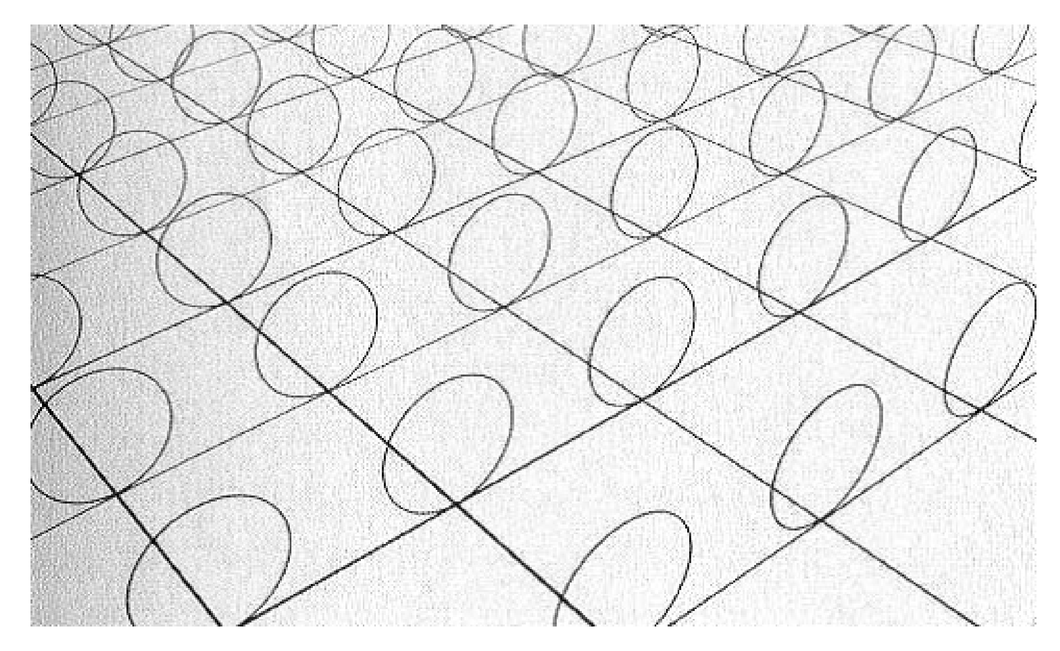


Figura 8.4 Las líneas de la cuadrícula representan las dimensiones extendidas o alargadas que captamos en nuestra experiencia habitual, mientras que los círculos son una nueva dimensión muy pequeña y arrollada. Como los bucles circulares de hilo que configuran el pelo de una alfombra, estos círculos existen en cada punto de las dimensiones alargadas que nos resultan familiares. Sin embargo, para poder visualizarlos claramente, los hemos dibujado diseminados sobre las intersecciones de las líneas de la cuadrícula.

La similitud con la manguera de jardín es manifiesta, aunque hay algunas diferencias importantes. El universo tiene tres dimensiones espaciales amplias y extendidas (de las cuales sólo hemos dibujado en realidad dos), en comparación con la única dimensión de la manguera, y, lo que es más importante, ahora estamos describiendo la estructura espacial del mismo *universo*, no simplemente la de un objeto, como la manguera, cuya existencia tiene lugar *dentro* del universo. Pero la idea básica es la misma: como en el caso del grosor circular de la manguera, si la

dimensión adicional, arrollada y circular del universo es extraordinariamente pequeña, es mucho más difícil de detectar que las dimensiones amplias y extendidas que se pueden observar a simple vista. De hecho, si su tamaño es suficientemente pequeño, estará más allá de la posibilidad de detectarla, incluso utilizando nuestros instrumentos de ampliación más poderosos. Además, es enormemente importante el hecho de que la dimensión circular *no es* meramente una protuberancia redonda dentro de las dimensiones extendidas conocidas, como la ilustración puede inducirnos a creer. Al contrario, la dimensión circular es una *nueva* dimensión que existe en todos y cada uno de los puntos de las dimensiones extendidas conocidas, del mismo modo que también existen en cada punto las dimensiones arriba-abajo, izquierda-derecha y atrás-adelante. Se trata de una dirección nueva e independiente en la que una hormiga, si fuera lo suficientemente pequeña, podría desplazarse. Para especificar la ubicación espacial de esta hormiga microscópica, tendríamos que decir dónde se encuentra en las tres dimensiones extendidas habituales (representadas por la cuadrícula) y también dónde está en la dimensión circular. Necesitaríamos cuatro datos espaciales; si incluimos el tiempo, se obtiene un total de cinco datos del espacio-tiempo, uno más que los utilizados normalmente.

Así pues, de una manera bastante sorprendente, vemos que, aunque sólo somos conscientes de tres dimensiones espaciales extendidas, el razonamiento de Kaluza y Klein demuestra que esto no imposibilita la existencia de dimensiones adicionales arrolladas, al menos en el caso de que sean muy pequeñas. Es muy posible que el universo tenga más dimensiones de las que el ojo puede captar.

¿Cuán pequeño es «pequeño»? Los aparatos más penetrantes pueden detectar estructuras tan pequeñas como una milésima de una billonésima de metro. Si una dimensión añadida está arrollada hasta tomar un tamaño menor que esta diminuta distancia, es demasiado pequeña para que nosotros podamos detectarla. En 1926 Klein combinó la sugerencia inicial de Kaluza con algunas ideas obtenidas a partir del incipiente campo de la mecánica cuántica. Sus cálculos indicaban que la dimensión circular adicional podría ser tan pequeña como la longitud de Planck, mucho más pequeña que lo que puede ser accesible experimentalmente. Desde entonces, los físicos han llamado *teoría de Kaluza-Klein*[58] a esta posibilidad de la existencia de nuevas dimensiones espaciales diminutas.

Idas y venidas sobre una manguera de jardín

El ejemplo tangible de la manguera y la ilustración de la Figura 8.3 pretenden dar una

idea de cómo es posible que nuestro universo tenga dimensiones espaciales adicionales. Pero, incluso para los investigadores especializados en este campo, es bastante difícil visualizar un universo con más de tres dimensiones espaciales. Por esta razón, los físicos a menudo agudizan su intuición en relación con estas dimensiones adicionales contemplando cómo sería la vida si viviéramos en un universo imaginario con *menos* dimensiones —siguiendo las directrices marcadas en el fascinante libro clásico de divulgación *Flatland* (Planilandia),[59] escrito por Edwin Abbott en 1884— en el que vamos constatando poco a poco que el universo tiene más dimensiones que aquellas de las que somos directamente conscientes. Intentemos esto imaginando un universo bidimensional con la misma forma que la manguera. Hacer esto requiere que renunciemos a esa perspectiva «desde el exterior» que ve la manguera como un objeto situado en nuestro universo. En vez de esto, hemos de salir del mundo que conocemos y entrar en un nuevo universo de la manguera, en el que la superficie de una manguera muy larga es *todo lo que hay* en cuanto a dominio espacial. Imagine usted que es una diminuta hormiga que vive en la superficie de la manguera.

Comencemos exagerando las cosas todavía un poco más. Supongamos que la longitud de la dimensión circular del universo de la manguera es muy corta, tan corta que ni usted ni ninguno de los demás habitantes que comparten con usted la manguera son conscientes de su existencia. Al contrario, todos los que viven en el universo de la manguera consideran como un hecho básico de su vida, tan evidente que estaría fuera de duda, que este universo tiene sólo *una* dimensión espacial. (Si el universo de la manguera hubiera producido su propia hormiga Einstein, los habitantes de dicha manguera dirían que el universo tiene una dimensión espacial y una dimensión temporal). De hecho, esta característica es tan evidente por sí misma que los habitantes de la manguera han llamado a su mundo *Linealandia*, recalcando así directamente que sólo tiene una dimensión espacial.

La vida en Linealandia es muy diferente de la vida que conocemos. Por ejemplo, el cuerpo humano que conocemos *no puede encajar* en Linealandia. Independientemente de los esfuerzos que usted haga por dar nueva forma a su cuerpo, algo de lo que no podrá escapar es que usted tiene en definitiva longitud, anchura y altura: la amplitud espacial en tres dimensiones. En Linealandia no cabe un diseño tan extravagante. Recuerde que, aunque su imagen mental de Linealandia siga ligada a un objeto largo y como un hilo que existe en nuestro espacio, lo que en realidad tiene que hacer es considerar a Linealandia como un *universo* —todo lo que hay está allí—. Como habitante de Linealandia, debe usted encajar perfectamente dentro de su amplitud espacial. Intente imaginárselo. Incluso si usted adopta la forma de una hormiga, seguirá sin encajar. Debe usted configurar su cuerpo de hormiga de tal modo que parezca más bien un gusano, y seguir configurándolo hasta que no tenga

ningún grosor. Para encajar en Linealandia debe convertirse en un ser que *solamente* tiene longitud.

Imagine además que tiene un ojo en cada extremo de su cuerpo. A diferencia de los ojos humanos, que pueden girar para mirar en las tres dimensiones, como ser lineal tiene usted unos ojos que están siempre fijos en su posición, mirando cada uno de ellos una distancia unidimensional. Esto *no es* una limitación anatómica de su nuevo cuerpo. Al contrario, usted y todos los demás seres lineales reconocen que, dado que Linealandia tiene una sola dimensión, sencillamente no existe otra dirección en la que sus ojos puedan mirar. Las miradas hacia delante y hacia atrás agotan la amplitud de Linealandia.

Podemos intentar ir más lejos imaginando la vida en Linealandia, pero nos damos cuenta rápidamente de que no hay mucho más que imaginar. Por ejemplo, si otro ser lineal se sitúa al lado de usted, imagínese qué aspecto ofrecerá: usted verá uno de sus ojos —el que esté enfrente de usted pero, a diferencia de los ojos humanos, el ojo que usted verá será un único punto. En Linealandia, los ojos no tienen ninguna característica y no expresan emociones, sencillamente, es que no hay espacio para que se den esas características habituales. Además, usted se quedará para siempre con esa imagen puntual del ojo de su vecino. Si quiere adelantarle y explorar el ámbito de Linealandia más allá de su cuerpo, se llevará una enorme decepción; *no puede adelantarle*. Le está «bloqueando el camino» a usted y no hay espacio en Linealandia para sortearlo. El orden en que los seres lineales están diseminados a lo largo del territorio de Linealandia es fijo e invariable. ¡Qué putada!

Unos cuantos miles de años después de que tuviera lugar una epifanía en Linealandia, un ser unidimensional llamado Kaluza K. Line ofreció algo de esperanza para los pisoteados habitantes de Linealandia. Ya fuera por divina inspiración, o por la mera exasperación ante unos ojos que miran fijo al ojo puntual de su vecino, sugirió que Linealandia, después de todo, podía no ser unidimensional. Sea como fuere, teorizaba, Linealandia es en realidad bidimensional, siendo la segunda dimensión espacial una dirección circular muy pequeña que, hasta ahora, ha conseguido evitar una detección directa, debido a su diminuta amplitud espacial. Kaluza va más allá y continúa haciendo el retrato de una vida que, en gran medida, es nueva, en el caso de que se expandiera en tamaño su dirección espacial arrollada —algo que por lo menos es posible según el trabajo reciente de otro colega, Linestein—. El señor Kaluza K. Line describe un universo que les asombra a usted y a sus paisanos de Linealandia y les llena de esperanza, un universo en el que los seres lineales pueden moverse libremente uno al lado del otro haciendo uso de la segunda dimensión: es el final de la esclavitud espacial. Vemos que Kaluza Kelineal describe la vida en un universo-manguera dotado de «grosor».

De hecho, si la dimensión circular creciera, «inflando» Linealandia dentro del

universo de la manguera, la vida de sus habitantes experimentaría cambios profundos. Piense en su cuerpo, por ejemplo. Siendo usted un ser lineal, todo lo que esté situado entre sus dos ojos constituye el interior de su cuerpo. Por consiguiente, sus ojos desempeñan con respecto a su cuerpo lineal el mismo papel que desempeña la piel en un cuerpo humano normal: constituyen para usted la barrera entre el interior de su cuerpo y el mundo exterior. En Linealandia un médico puede acceder al interior de su cuerpo lineal solamente haciendo una punción en su superficie; en otras palabras, la «cirugía» en Línealandia se realiza a través de los ojos.

Pero imaginemos ahora lo que sucede si, al estilo del señor Kaluza K. Line, Linealandia tiene una dimensión arrollada secreta, y si esta dimensión se amplía hasta alcanzar un tamaño observable. En este caso, un ser lineal podría mirar el cuerpo de otro con un cierto ángulo y, de ese modo, ver directamente en su interior, como se ilustra en la Figura 8.5. Utilizando esta segunda dimensión, un médico puede operar cualquier cuerpo accediendo directamente a ese interior que está al descubierto. Esto resulta más bien extraño. Con el tiempo, los seres lineales desarrollarían, sin lugar a dudas, una cubierta parecida a la piel para proteger del contacto con el mundo exterior ese interior de sus cuerpos que recientemente había quedado al descubierto. Además, indudablemente evolucionarían convirtiéndose en seres con longitud y anchura: seres planos que se deslizarían por el universo-manguera bidimensional, como se ilustra en la Figura 8.6. Si la dimensión circular creciera hasta alcanzar un tamaño muy grande, este universo bidimensional se parecería mucho a la *Flatland* de Abbott: un mundo bidimensional imaginario al que Abbott dotó de un rico patrimonio cultural e incluso de un satírico sistema de castas basado en la forma geométrica de cada uno. Mientras que resulta difícil imaginarse que en Linealandia pueda suceder *algo* interesante —sencillamente porque no hay espacio suficiente— la vida sobre la manguera está llena de posibilidades. La evolución de una a dos dimensiones espaciales amplias y observables es un paso decisivo.

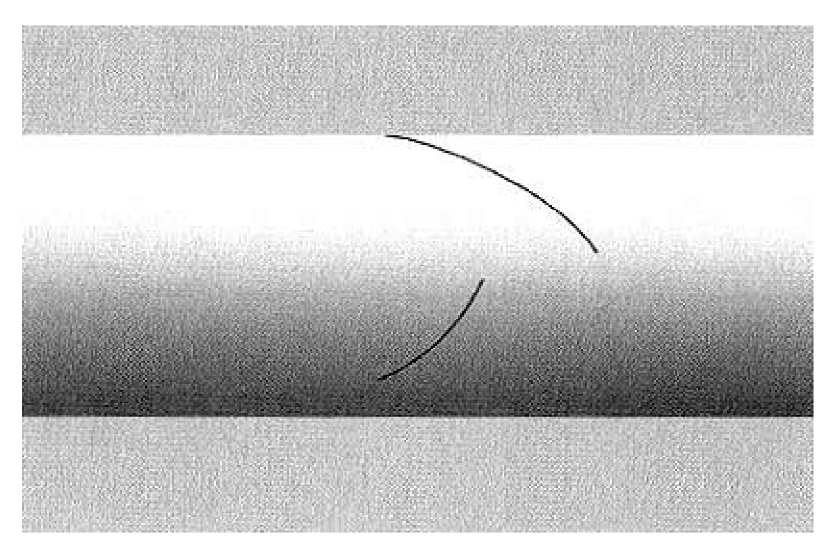


Figura 8.5 Un ser lineal puede ver directamente en el interior del cuerpo de otro cuando

Linealandia se expande dentro del universo de la manguera.

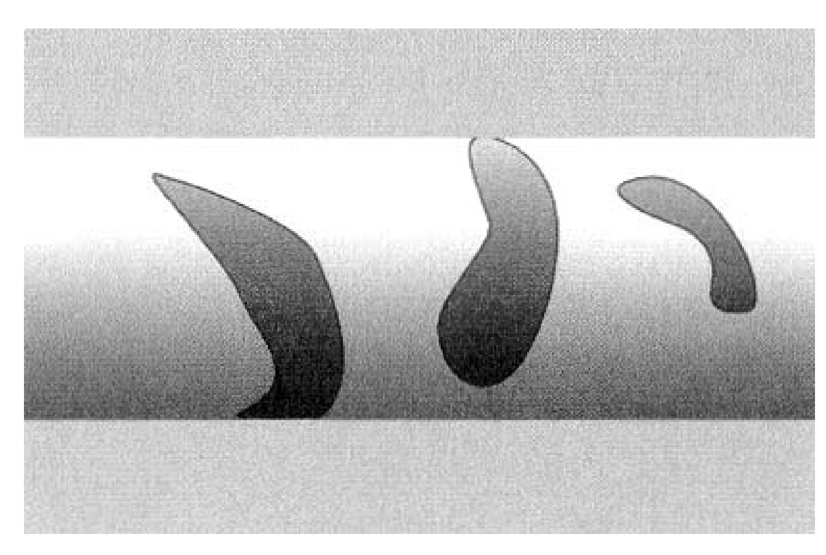


Figura 8.6 Seres planos bidimensionales que viven en el universo de la manguera.

Y ahora el estribillo: ¿por qué detenerse ahí? El universo bidimensional podría tener él mismo una dimensión arrollada y ser, por lo tanto, tridimensional en secreto. Podemos ilustrar esto mediante la Figura 8.4, si tenemos en cuenta que ahora nos estamos imaginando que *hay* sólo dos dimensiones espaciales extendidas (mientras que, cuando presentamos por primera vez esta figura nos estábamos imaginando la cuadrícula plana para representar tres dimensiones extendidas). Si la dimensión circular se ampliara, un ser bidimensional se encontraría en un mundo totalmente nuevo en el que el movimiento no estaría limitado sólo a los desplazamientos izquierda-derecha y atrás— adelante recorriendo las dimensiones extendidas. Sin embargo, los seres también pueden moverse en una tercera dimensión, la dirección «arriba-abajo» en el círculo. De hecho, si la dimensión circular creciera hasta alcanzar tamaño suficiente, éste podría ser nuestro universo tridimensional. Por el momento, no sabemos si alguna de nuestras tres dimensiones espaciales, se extiende hacia fuera indefinidamente, o si de hecho está arrollada sobre sí misma con la forma de un círculo gigantesco, más allá del alcance de nuestros más potentes telescopios. Si la dimensión circular de la Figura 8.4 se hiciera suficientemente grande —con una extensión de miles de millones de años luz— esta figura bien podría ser una representación de nuestro mundo.

Pero el estribillo vuelve a decir: ¿por qué detenernos aquí? Esto nos lleva a la visión de Kaluza y Klein: nuestro universo tridimensional podría tener una cuarta dimensión espacial arrollada de la que no se ha dicho nada anteriormente. Si esta chocante posibilidad, o su generalización a numerosas dimensiones arrolladas (de las que hablaremos en breve) resulta cierta, y si estas dimensiones arrolladas se ampliaran hasta un tamaño macroscópico, los ejemplos con dimensiones inferiores que ya hemos comentado dejan muy claro que la vida, tal como la conocemos,

cambiaría enormemente.

Sin embargo, de manera sorprendente, incluso si continuaran siendo arrolladas y pequeñas, la existencia de dimensiones arrolladas adicionales tiene profundas implicaciones.

Unificación en más dimensiones

Aunque la sugerencia formulada por Kaluza en 1919 de que nuestro universo podría tener más dimensiones espaciales que aquellas de las que somos conscientes directamente, fue de propio derecho una posibilidad digna de atención, hubo algo más que la hizo imprescindible. Einstein había formulado la relatividad general en el marco habitual de un universo dotado de tres dimensiones espaciales y una temporal. Sin embargo, el formalismo matemático de su teoría se podría extender muy directamente al desarrollo de ecuaciones análogas para un universo que tuviera dimensiones espaciales adicionales. Partiendo de la «modesta» suposición de que existe una dimensión espacial adicional, Kaluza desarrolló el análisis matemático pertinente y obtuvo de forma explícita las nuevas ecuaciones.

Descubrió que, en la formulación revisada, las ecuaciones que correspondían a las tres dimensiones ordinarias eran esencialmente idénticas a las de Einstein. Pero, debido a que incluyó una dimensión espacial adicional, no sorprende que Kaluza hallara otras ecuaciones además de las que dedujo Einstein inicialmente. Después de estudiar las ecuaciones adicionales asociadas con la nueva dimensión, Kaluza se dio cuenta de que estaba sucediendo algo sorprendente. ¡Las ecuaciones adicionales no eran otras que las que Maxwell había desarrollado en la década de 1880 para describir la fuerza electromagnética! Al añadir otra dimensión espacial, Kaluza había unido la teoría de la gravedad de Einstein con la teoría de la luz de Maxwell.

Antes de que Kaluza formulara su sugerencia, la gravedad y el electromagnetismo se consideraban como dos fuerzas independientes; no existía el más mínimo indicio de que pudiera haber una relación entre ellas. Haciendo gala de una audaz creatividad consistente en imaginar que nuestro universo tiene una dimensión espacial adicional, Kaluza sugirió que en realidad existía una estrecha relación entre ambas fuerzas. Su teoría afirmaba que tanto la gravedad como el electromagnetismo están asociados con unas ondulaciones existentes en la estructura del espacio. La gravedad es transportada por ondulaciones de las tres dimensiones espaciales habituales, mientras que el electromagnetismo es transportado por ondulaciones en las que participa la nueva dimensión arrollada.

Kaluza envió este trabajo a Einstein y éste al principio se quedó bastante intrigado. El 21 de abril de 1919, Einstein contestó por carta a Kaluza, diciéndole que nunca se le había ocurrido a él que la unificación se pudiera conseguir «mediante un mundo cilíndrico de cinco dimensiones (cuatro espaciales y una temporal)». A esto añadía: «A primera vista, me gusta enormemente la idea que ha tenido usted».[60] Alrededor de una semana más tarde, sin embargo, Einstein escribió de nuevo a Kaluza, esta vez con un cierto escepticismo: «He leído todo su trabajo y lo encuentro realmente interesante. Hasta ahora, no he visto en él nada que me parezca imposible. Por otra parte, tengo que admitir que los argumentos que se plantean por el momento no parecen suficientemente convincentes».[61] No obstante, posteriormente, el 14 de octubre de 1921, transcurridos más de dos años, Einstein volvió a escribir a Kaluza, después de haber tenido tiempo de digerir el incómodo planteamiento de éste de un modo más completo: «Me estoy replanteando lo que hice hace dos años al disuadirle de publicar su idea sobre una unificación de la gravedad y la electricidad… Si usted lo desea, presentaré su trabajo a la academia».[62] Aunque tardíamente, Kaluza había recibido el sello de aprobación del maestro.

A pesar de ser una idea estupenda, un estudio minucioso realizado posteriormente sobre la propuesta de Kaluza, ampliado mediante las contribuciones de Klein, demostró que esta propuesta presentaba serias contradicciones con algunos datos experimentales. Los intentos más sencillos de incorporar el electrón a esta teoría predecían unas relaciones entre su masa y su carga que resultaban muy diferentes de los valores que daban las mediciones. Dado que no parecía existir un modo obvio de evitar este problema, muchos de los físicos que habían tomado en cuenta la idea de Kaluza perdieron su interés por ella. Einstein y otros continuaron barajando, una y otra vez, la posibilidad de la existencia de dimensiones adicionales arrolladas, pero todo esto se convirtió pronto en un tema confinado en el extrarradio de la física teórica.

En realidad, la idea de Kaluza iba muy por delante de su tiempo. La década de 1920 marcó el comienzo de un mercado alcista para la física teórica y experimental que se ocupaba de la comprensión de las leyes básicas del mundo microscópico. Los teóricos tenían las manos llenas cuando se pusieron a intentar desarrollar la estructura de la mecánica cuántica y la teoría cuántica de campos. Los investigadores experimentales disponían de las propiedades detalladas del átomo, así como de la posibilidad de descubrir muchos otros constituyentes elementales de la materia. La teoría guiaba los experimentos y los experimentos ajustaban la teoría en el proceso en que los físicos estuvieron avanzando durante medio siglo, para llegar finalmente a descubrir el modelo estándar. No es de extrañar que las especulaciones sobre dimensiones adicionales quedaran muy atrás en la distancia durante esta época productiva y vertiginosa. Por estar los físicos explorando unos poderosos métodos

cuánticos, cuyas implicaciones hicieron surgir varias predicciones comprobables experimentalmente, suscitaba poco interés la mera posibilidad de que el universo pudiera ser un lugar muy diferente a escalas de longitud demasiado pequeñas para ser comprobadas ni siquiera con los más poderosos instrumentos.

Pero, antes o después, estos mercados alcistas empezaron a perder gas. A finales de la década de 1960 y principios de la de 1970, estaba lista la estructura teórica del modelo estándar. A finales de la década de 1970 y principios de la década de 1980, muchas de las predicciones de este modelo se habían verificado experimentalmente, y la mayoría de los físicos de partículas llegaron a la conclusión de que sólo era cuestión de tiempo que se confirmara también el resto. Aunque quedaron sin resolver unos pocos detalles importantes, muchos pensaron que las cuestiones importantes relativas a las fuerzas nuclear fuerte, nuclear débil y electromagnética habían obtenido respuesta.

Finalmente, llegó el momento de dar respuesta a la cuestión más importante de todas: el enigmático conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. El éxito de conseguir formular una teoría cuántica de tres de las fuerzas de la naturaleza dio ánimo a los físicos para tratar de llevar al redil a la cuarta fuerza, la de la gravedad. Después de ir detrás de numerosas ideas que fallaban en última instancia, la mentalidad de los científicos se hizo más abierta para aceptar planteamientos que eran comparativamente más radicales. Después de haber sido dada por muerta a finales de la década de 1920, la teoría de Kaluza y Klein resucitó.

La moderna teoría de Kaluza-Klein

Los conocimientos físicos habían cambiado significativamente y habían llegado a ser mucho más profundos durante las seis décadas posteriores a la propuesta original de Kaluza. La mecánica cuántica se había formulado en su totalidad y se había verificado experimentalmente. Se habían descubierto las fuerzas nucleares débil y fuerte, desconocidas en la década de 1920, y se había llegado a un alto grado de comprensión de ambas fuerzas. Algunos físicos sugirieron que la propuesta original de Kaluza había fallado porque éste no era consciente de la existencia de estas otras fuerzas y, por consiguiente, había sido demasiado *conservador* en su renovación del espacio. Más fuerzas significaba la necesidad de aún más dimensiones. Se argumentó que una única dimensión circular nueva, aunque podía mostrar indicios de una conexión entre la relatividad general y el electromagnetismo, simplemente no era suficiente.

A mediados de la década de 1970, se estaba realizando un intenso esfuerzo de investigación centrado en teorías que utilizaban más dimensiones con numerosas direcciones espaciales arrolladas. La Figura 8.7 ilustra un ejemplo con dos dimensiones adicionales que están arrolladas en la superficie de una bola —es decir, una esfera—.

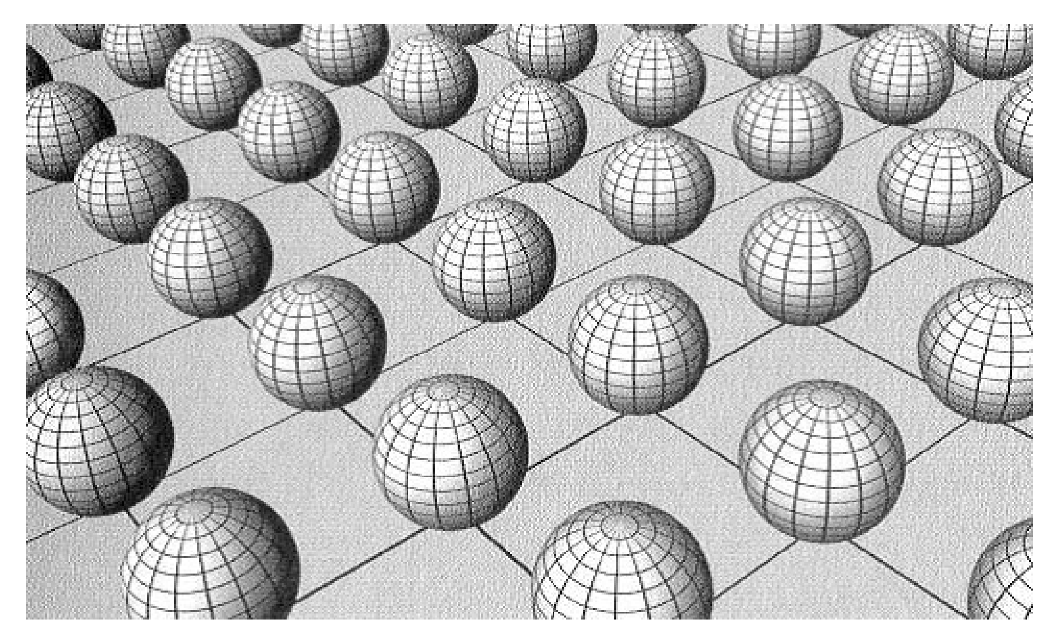


Figura 8.7 Dos dimensiones adicionales arrolladas tomando su forma en la superficie de una esfera.

Como en el caso de la dimensión circular única, estas dimensiones adicionales están sujetas a *cada uno de los puntos* de las dimensiones extendidas que nos resultan familiares. (Para que esto resulte más claro visualmente, hemos dibujado de nuevo tan sólo una muestra ilustrativa de las dimensiones esféricas en puntos regularmente espaciados de la cuadrícula de las dimensiones extendidas). Además de proponer un número diferente de dimensiones adicionales, podemos imaginar también otras formas para estas dimensiones. Por ejemplo, en la Figura 8.8 ilustramos una posibilidad en la que existen de nuevo dos dimensiones adicionales, ahora en forma de una rosquilla hueca —es decir, un toro—. Aunque están más allá de nuestra capacidad de dibujar, es posible imaginarse posibilidades más complicadas en las que existen tres, cuatro, cinco, o esencialmente cualquier número de dimensiones espaciales adicionales, arrolladas en un amplio espectro de formas exóticas. El requisito esencial, de nuevo, es que todas estas dimensiones tengan una extensión espacial menor que las escalas de longitud más pequeñas que podamos comprobar, ya que ningún experimento ha puesto de manifiesto todavía su existencia.

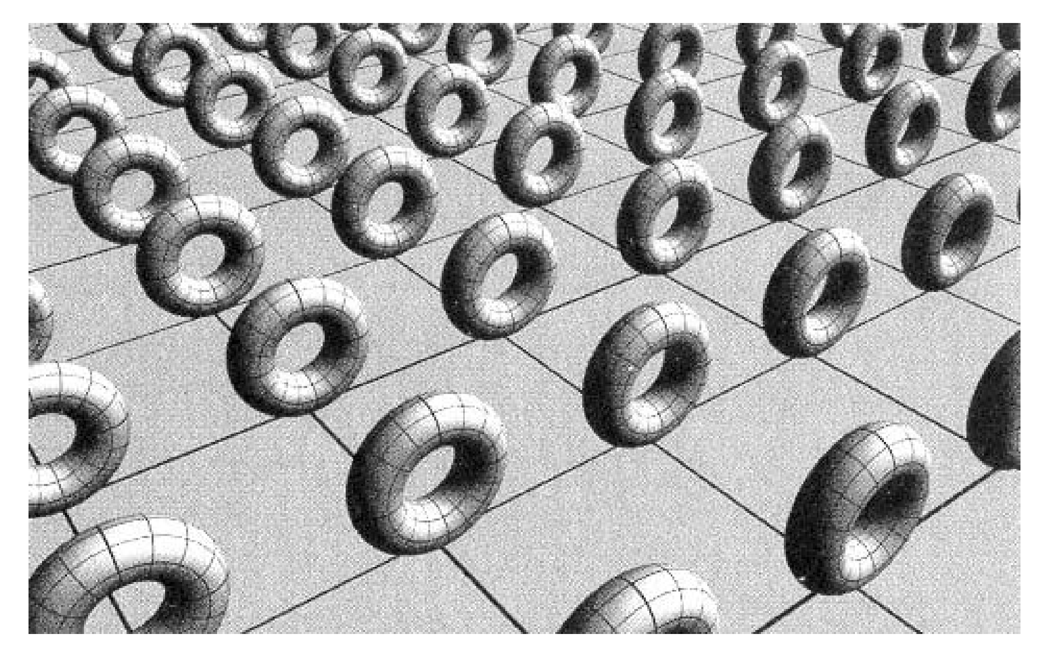


Figura 8.8 Dos dimensiones adicionales arrolladas tomando su forma sobre la superficie de una rosquilla hueca, es decir, un toro.

La más prometedora de todas las propuestas relativas a dimensiones superiores fueron las que incluían también la supersimetría. Los físicos esperaban que la anulación parcial de las fluctuaciones cuánticas más intensas, que surgían del emparejamiento de las partículas constituyentes de superparejas, contribuiría a suavizar las hostilidades existentes entre la gravedad y la mecánica cuántica. Acuñaron el término *supergravedad extradimensional* para describir aquellas teorías que incluían la gravedad, las dimensiones adicionales y la supersimetría.

Como sucedió en el caso del intento original de Kaluza, hubo varias versiones de la supergravedad extradimensional que al principio parecían bastante prometedoras. Las nuevas ecuaciones que resultaron como consecuencia de las dimensiones adicionales evocaban sorprendentemente las que se utilizaron en la descripción del electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil. Pero un detallado análisis demostró que los antiguos enigmas persistían. Lo que es aún más importante, las perniciosas ondulaciones cuánticas del espacio en distancias cortas quedaron reducidas por efecto de la supersimetría, pero no lo suficiente como para dar lugar a una teoría coherente. Los físicos encontraron también dificultades para hallar una teoría única y coherente con dimensiones superiores que incluyera todas las características de las fuerzas y la materia.[63] Fue quedando claro de forma gradual que estaban saliendo a la superficie fragmentos y elementos de una teoría unificada, pero que faltaba un elemento crucial capaz de ligar todo ello, uniéndolo de una manera coherente desde el punto de vista de la mecánica cuántica. En 1984, esta pieza que faltaba —la teoría de cuerdas— hizo una espectacular entrada en esta historia y asumió un papel fundamental.

Más dimensiones y la teoría de cuerdas

A estas alturas debería estar usted convencido de que nuestro universo puede tener otras dimensiones espaciales arrolladas; ciertamente, siempre que sean suficientemente pequeñas, no hay ninguna razón para descartarlas. Sin embargo, las dimensiones adicionales pueden extrañarnos por parecer algo artificial. Nuestra incapacidad para comprobar distancias menores que una milésima de billonésima de metro permite la existencia, no sólo de dimensiones adicionales muy pequeñas, sino también de todo tipo de posibilidades caprichosas —incluso una civilización microscópica cuya población estaría constituida por hombrecillos verdes aún más diminutos—. Mientras que lo primero parece tener ciertamente más motivos racionales para ser cierto que lo segundo, el hecho de postular cualquiera de estas posibilidades no comprobadas experimentalmente —y, por ahora, imposibles de comprobar— podría parecer igualmente arbitrario.

Así estaban las cosas hasta que llegó la teoría de cuerdas. Se trata de una teoría que resuelve el dilema central con que se enfrenta la física contemporánea —la incompatibilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general— y que unifica nuestra comprensión de todas las fuerzas y todos los constituyentes materiales fundamentales de la naturaleza. Pero para realizar estas proezas, resulta que la teoría de cuerdas *requiere* que el universo tenga dimensiones espaciales adicionales.

He aquí el porqué. Una de las ideas principales de la mecánica cuántica es que nuestro poder de predicción está limitado fundamentalmente a afirmar que tal y tal suceso tiene tal y tal probabilidad de ocurrir. Aunque Einstein pensaba que ésta era una desagradable característica de nuestros modernos conocimientos, y puede que usted esté de acuerdo, parece desde luego que se trata de un hecho. Aceptémoslo. Ahora bien, todos sabemos que las probabilidades siempre son números comprendidos entre 0 y 1; de un modo equivalente, cuando se expresan mediante porcentajes, las probabilidades son números comprendidos entre 0 y 100. Los físicos han descubierto que una señal indiscutible de que una teoría encuadrada en la mecánica cuántica no funciona correctamente es que algunos cálculos den como resultado «probabilidades» que *no* están dentro de este intervalo aceptable. Por ejemplo, anteriormente hemos mencionado que una señal de la chirriante incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica en un marco de partículas puntuales es que existen cálculos que dan como resultado probabilidades infinitas. Como ya hemos comentado, la teoría de cuerdas evita estos infinitos. Pero, lo que no hemos mencionado hasta ahora es que aún queda sin resolver un problema residual, algo más sutil. En los primeros días de la teoría de cuerdas, algunos físicos descubrieron que ciertos cálculos daban como resultado probabilidades *negativas*, que también están fuera del intervalo de lo aceptable. Por lo tanto, a primera vista, la

teoría de cuerdas parecía estar patinando en su propia mierda mecánico-cuántica.

Haciendo gala de una terca obstinación, los físicos buscaron y encontraron la causa de este hecho inaceptable. La explicación empieza con una sencilla observación. Si una cuerda tiene que estar necesariamente sobre una superficie bidimensional —como la superficie de una mesa o de una manguera— el número de direcciones independientes en las que puede vibrar se reduce a *dos*: la dimensión izquierda-derecha y la dimensión atrás-adelante sobre la superficie. Cualquier patrón vibratorio que permanezca sobre dicha superficie incluye alguna combinación de vibraciones en estas dos direcciones. Consecuentemente, vemos que esto también significa que una cuerda de Planilandia, del universo de la manguera o de cualquier otro universo bidimensional no tiene más remedio que vibrar en un total de dos direcciones espaciales independientes. Sin embargo, si la cuerda puede salir de esa superficie, el número de direcciones de vibración independientes aumenta a tres, ya que la cuerda puede oscilar también en la dirección arriba-abajo. De manera equivalente, en un universo que tenga tres dimensiones espaciales, una cuerda puede vibrar en tres direcciones independientes. Aunque esto es difícil de imaginar, el patrón continúa: en un universo con un número aún mayor de dimensiones espaciales, existen aún más direcciones independientes en las que puede vibrar.

Recalcamos este hecho de las vibraciones de las cuerdas porque los físicos descubrieron que los problemáticos cálculos eran altamente sensibles al número de direcciones independientes en las que puede vibrar una cuerda. Las probabilidades negativas surgían a partir de una *discrepancia* entre lo que la teoría exigía y lo que la realidad parecía imponer: los cálculos demostraron que, si las cuerdas podían vibrar en *nueve* direcciones espaciales independientes, todas las probabilidades negativas se cancelarían. En teoría esto es formidable, pero ¿de qué sirve? Si se supone que la teoría de cuerdas describe nuestro mundo, que tiene tres dimensiones espaciales, parece que seguimos teniendo dificultades.

Pero ¿realmente las tenemos? Siguiendo una directriz que tiene ya más de medio siglo, vemos que Kaluza y Klein proporcionaron una salida del atolladero. Dado que las cuerdas son tan pequeñas, no sólo pueden vibrar en dimensiones amplias y extendidas, sino que también pueden vibrar en otras que son muy pequeñas y arrolladas. De esta manera, *podemos* satisfacer el requerimiento de las nueve dimensiones espaciales que exige la teoría de cuerdas en *nuestro* universo, aceptando —al estilo de Kaluza y Klein— que, además de las tres dimensiones espaciales extendidas que nos resultan familiares, existen otras seis dimensiones espaciales arrolladas. Así, la teoría de cuerdas, que parecía estar a punto de ser eliminada del dominio de las teorías físicas importantes, se salva. Además, en vez de limitarse a postular la existencia de dimensiones adicionales, como habían hecho Kaluza y Klein, y sus seguidores, la teoría de cuerdas *requiere* estas dimensiones. Para que la

teoría de cuerdas sea aplicable de manera coherente, el universo tendrá que tener nueve dimensiones espaciales y una dimensión temporal, con un total de diez dimensiones. De este modo, la propuesta formulada por Kaluza en 1919 encuentra su foro más convincente y poderoso.

Algunas preguntas

Esto plantea varias preguntas. En primer lugar, ¿por qué requiere la teoría de cuerdas un número concreto de nueve dimensiones espaciales para evitar que la probabilidad aparezca con unos valores que no tienen sentido? Ésta es probablemente, dentro la teoría de cuerdas, la pregunta más difícil de contestar sin recurrir a formalismos matemáticos. Un claro cálculo mediante la teoría de cuerdas revela cuál es la respuesta, pero nadie puede explicar de una manera intuitiva y que no sea técnica el porqué del número concreto que se obtiene. El físico Ernest Rutherford dijo una vez, en esencia, que si no podemos explicar un resultado en términos sencillos y sin tecnicismos, entonces en realidad no lo entendemos. No quería decir que esto significara que el resultado estaba equivocado; lo que quería decir era que significa que no se entiende su origen, su significado o sus implicaciones. Quizá esto sea cierto con respecto a la cuestión de las dimensiones adicionales en la teoría de cuerdas. (En efecto, aprovechemos esta oportunidad para abrazar, entre paréntesis, un aspecto central de la segunda revolución de las supercuerdas que comentaremos en el capítulo 12. La conclusión de que hay diez dimensiones del espacio-tiempo —nueve espaciales y una temporal— resulta ser *aproximada*. A mediados de la década de 1990, Witten, basándose en sus propias ideas y en un trabajo anterior de Michael Duff, de la Universidad *A&M* de Texas y Chris Hull y Paul Townsend de la Universidad de Cambridge, dio una prueba convincente de que dicho cálculo aproximado pierde en realidad una dimensión espacial: la teoría de cuerdas, dijo Witten ante la extrañeza de la mayoría de los teóricos de dicha teoría, requiere realmente *diez* dimensiones espaciales y una dimensión temporal, con un total de *once* dimensiones. Ignoraremos esta importante conclusión hasta llegar al capítulo 12, ya que tendrá poca importancia directa en las cuestiones que trataremos antes de dicho capítulo).

En segundo lugar, si las ecuaciones de la teoría de cuerdas (o, más concretamente, las ecuaciones aproximadas que guían nuestra discusión previa al capítulo 12) muestran que el universo tiene nueve dimensiones espaciales y una dimensión temporal, ¿por qué sucede que las tres dimensiones espaciales (y la dimensión

temporal) son amplias y extendidas mientras que todas las otras son diminutas y arrolladas? ¿Por qué no son *todas* extendidas, o todas arrolladas, o alguna otra posibilidad intermedia? Por ahora nadie conoce las respuestas a estas preguntas. Si la teoría de cuerdas es correcta, tendríamos que ser capaces de obtener finalmente la respuesta, pero por el momento nuestro conocimiento de la teoría no es lo suficientemente refinado como para alcanzar este objetivo. No es que no se hayan realizado audaces intentos para lograr una explicación. Por ejemplo, desde una perspectiva cosmológica, podemos imaginar que todas las dimensiones comienzan siendo del tipo arrollado y luego, en una explosión parecida al big bang, las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal se despliegan y alargan hasta conseguir su amplia extensión actual, como explicaremos en el capítulo 14, pero hay que decir honradamente que estas explicaciones se encuentran en etapa de formación. De aquí en adelante, aceptaremos la premisa de que, salvo tres dimensiones espaciales, todas las demás son arrolladas, de acuerdo con lo que podemos ver a nuestro alrededor. Un primer objetivo de la investigación moderna es establecer que esta premisa surge de la propia teoría.

En tercer lugar, dado el requisito de que existan numerosas dimensiones adicionales, ¿es posible que algunas sean dimensiones adicionales *temporales*, en contraposición a las dimensiones adicionales espaciales? Si reflexionamos sobre esto durante un momento, nos damos cuenta de que es una posibilidad realmente extraña. Todos tenemos una forma visceral de comprender lo que significa para el universo la existencia de múltiples dimensiones espaciales, ya que vivimos en un mundo en el que se maneja constantemente una pluralidad de dimensiones, concretamente, tres. Pero ¿qué significaría tener múltiples tiempos? ¿Nos alinearíamos con el tiempo tal como lo experimentamos ahora psicológicamente, mientras que el otro tiempo sería en cierto modo «diferente»?

Resulta aún más extraño pensar en una dimensión temporal arrollada. Por ejemplo, si una diminuta hormiga caminara recorriendo una dimensión espacial adicional que está arrollada en forma de círculo, se encontraría con que vuelve a la misma posición una y otra vez después de atravesar circuitos completos. En esto hay poco misterio, ya que nos resulta familiar la posibilidad del retorno, digámoslo así, a la misma ubicación en el espacio tantas veces como queramos. Pero, si una dimensión arrollada es una dimensión temporal, atravesarla significa volver, después de un lapso temporal, a *un instante previo en el tiempo*. Desde luego, esto está mucho más allá del ámbito de nuestra experiencia. El tiempo, tal como lo conocemos, es una dimensión que podemos atravesar sólo en una dirección y de una forma absolutamente inevitable, pues nunca se puede volver a un instante determinado después de que éste ha transcurrido. Por supuesto, podría ser que las dimensiones temporales arrolladas tuvieran unas propiedades muy diferentes de las que tiene la

amplia dimensión temporal que nos resulta familiar y que nos imaginamos como algo que se remonta a la creación del universo y alcanza hacia delante hasta el momento actual. Sin embargo, está claro que, al contrario que las dimensiones espaciales adicionales, las dimensiones temporales nuevas y anteriormente desconocidas requieren una reestructuración aún mayor de nuestra intuición. Algunos teóricos han explorado la posibilidad de incorporar dimensiones temporales adicionales a la teoría de cuerdas, pero por ahora no se ha llegado a nada concluyente. En nuestra discusión sobre la teoría de cuerdas, nos vamos a atener al planteamiento más «convencional» en el que todas las dimensiones arrolladas son dimensiones espaciales, pero la intrigante posibilidad de la existencia de nuevas dimensiones temporales podría desde luego desempeñar un papel en futuros desarrollos de la teoría.

Las implicaciones físicas de las dimensiones extra

Muchos años de investigación, que se remontan al original trabajo de Kaluza, han demostrado que, aunque cualquier dimensión adicional que un físico proponga ha de ser menor que lo que nosotros o nuestros instrumentos puedan «ver» directamente (ya que no hemos visto ninguna), estas dimensiones adicionales sí que tienen importantes efectos *indirectos* en los fenómenos físicos que observemos. En la teoría de cuerdas, esta relación entre las propiedades microscópicas del espacio y los fenómenos físicos que observamos es particularmente transparente.

Para comprender esto, es necesario recordar que las masas y las cargas de las partículas en la teoría de cuerdas están determinadas por los posibles patrones vibratorios resonantes de las cuerdas. Imaginemos una diminuta cuerda que se mueve y oscila, y nos daremos cuenta de que los patrones resonantes están influenciados por el entorno espacial de la cuerda. Pensemos, por ejemplo, en las olas del océano. Fuera, en la gran extensión del océano abierto, los patrones de onda aislados son relativamente libres de formarse y recorrer un camino u otro. Esto es muy parecido a lo que sucede con los patrones vibratorios de una cuerda cuando ésta se mueve por unas dimensiones espaciales amplias y extendidas. Como se dijo en el capítulo 6, en cualquier momento una cuerda como ésta es libre de oscilar en cualquiera de las direcciones amplias y extendidas. Pero, si una ola del océano atraviesa un entorno espacial más estrecho, la forma concreta de su movimiento ondulatorio se verá seguramente afectada debido, por ejemplo, a la profundidad del agua, la situación y la forma de las rocas con las que choque, los canales por los que circule el agua, etc. O si no, pensemos en un tubo de órgano o en una trompa. Los sonidos que cada uno de

estos instrumentos puede producir son una consecuencia directa de los patrones resonantes de las corrientes de aire que vibran en su interior; estos modelos están determinados por el tamaño exacto y la forma de los entornos espaciales que se encuentran en el interior del instrumento y a través de los cuales se canalizan las corrientes de aire. Las dimensiones espaciales arrolladas tienen un impacto similar en los posibles patrones vibratorios de una cuerda. Dado que las diminutas cuerdas vibran en a través de todas las dimensiones espaciales, el modo exacto en que las dimensiones adicionales están retorcidas y arrolladas unas sobre otras ejerce una fuerte influencia y condiciona firmemente los posibles patrones vibratorios resonantes. Estos patrones, determinados en gran parte por la geometría extradimensional, constituyen la gama de las posibles propiedades de las partículas que se observan en las amplias dimensiones extendidas que nos resultan familiares. Esto significa que *la geometría extradimensional determina los atributos físicos fundamentales, como son las masas y las cargas de las partículas que observamos en las tres amplias dimensiones espaciales habituales de la experiencia cotidiana*.

Ésta es una cuestión tan profunda e importante que la vamos a explicar otra vez, con sentimiento. Según la teoría de cuerdas, el universo está formado por cuerdas diminutas cuyos patrones resonantes de vibración son el origen microscópico de las masas y cargas de fuerza de las partículas. La teoría de cuerdas requiere también dimensiones espaciales adicionales que deben estar arrolladas hasta alcanzar un tamaño muy pequeño para ser consistentes con el hecho de que nunca las hayamos visto. Pero una cuerda diminuta puede calar un espacio diminuto. Cuando una cuerda se mueve, oscilando mientras se desplaza, la forma geométrica de las dimensiones adicionales desempeña un papel fundamental para determinar patrones resonantes de vibración. Debido a que los patrones de vibraciones de las cuerdas se nos manifiestan como masas y cargas de partículas elementales, llegamos a la conclusión de que estas propiedades fundamentales del universo están determinadas en gran medida por el tamaño y la forma geométrica de las dimensiones adicionales. Ésta es una de las ideas de mayor alcance de la teoría de cuerdas.

Dado que las dimensiones adicionales influyen tan profundamente en las propiedades físicas básicas del universo, deberíamos intentar ahora —con un vigor desenfrenado— llegar al conocimiento del aspecto que tienen estas dimensiones arrolladas.

¿Qué aspecto tienen las dimensiones arrolladas?

Las dimensiones espaciales adicionales de la teoría de cuerdas no se pueden «arrugar» de ninguna manera; las fórmulas que surgen de la teoría restringen severamente la forma geométrica que pueden adoptar. En 1984, Philip Candelas de la Universidad de Texas en Austin, Gary Horowitz y Andrew Strominger de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Edward Witten demostraron que un tipo particular de formas geométricas de seis dimensiones podían cumplir estas condiciones. Se conocen como *espacios de Calabi-Yau* (o *formas de Calabi-Yau*) en honor de dos matemáticos, Eugenio Calabi de la Universidad de Pensilvania y Shing-Tung Yau de la universidad de Harvard, cuya investigación en un contexto relacionado, pero anterior a la teoría de cuerdas, desempeña un papel fundamental para la comprensión de estos espacios.

Aunque las matemáticas que describen los espacios de Calabi-Yau son intrincadas y sutiles, podemos hacernos una idea del aspecto que tienen estos espacios mediante una ilustración.[64]

En la Figura 8.9 mostramos un ejemplo de espacio de Calabi-Yau.[65] Cuando se contempla esta figura, hay que tener presente que la imagen tiene limitaciones. Estamos intentando representar una forma en seis dimensiones sobre un papel bidimensional, y esto introduce distorsiones importantes. No obstante, la imagen transmite una idea aproximada del aspecto que tiene un espacio de Calabi-Yau.[66] La forma de la Figura 8.9 no es más que un ejemplo de las decenas de miles de formas de Calabi-Yau que cumplen los restrictivos requerimientos para las dimensiones extra que surgen de la teoría de cuerdas. Aunque el hecho de pertenecer a un club que tiene decenas de miles de miembros podría no sonar muy exclusivo, deberíamos comparar esto con el número infinito de formas que son matemáticamente posibles; en este sentido los espacios de Calabi-Yau son realmente raros.

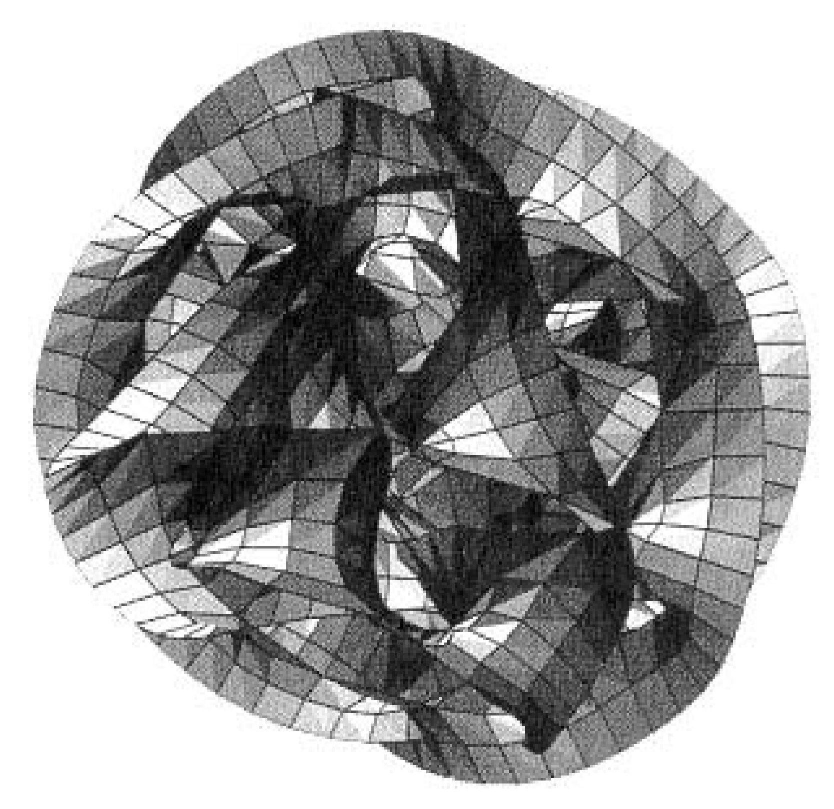


Figura 8.9 Ejemplo de espacio de Calabi-Yau.

Para ver las cosas en conjunto, tendríamos que imaginar ahora que sustituimos cada una de las esferas de la Figura 8.7 —que representa dos dimensiones arrolladas — por un espacio de Calabi-Yau. Es decir, en cada punto de las tres dimensiones extendidas que nos resultan familiares, la teoría de cuerdas afirma que hay seis dimensiones de las que hasta ahora no se había hablado, arrolladas firmemente dentro de una de esas formas de apariencia más bien complicada, como se ilustra en la Figura 8.10. Estas dimensiones son una parte integral y ubicua de la estructura espacial; existen en todas partes. Por ejemplo, si usted describe con la mano un amplio arco, no sólo se está moviendo a través de las tres dimensiones extendidas, sino también a través de las dimensiones arrolladas. Por supuesto, dado que las dimensiones arrolladas son tan pequeñas, cuando usted mueve la mano las está recorriendo un enorme número de veces, volviendo repetidamente al punto de partida. Su diminuta extensión significa que no hay mucho espacio para mover un objeto grande, como una mano; el resultado final es que, después de hacer un barrido con el brazo, usted no es consciente en absoluto del viaje que ha realizado a través de las dimensiones arrolladas de Calabi-Yau.

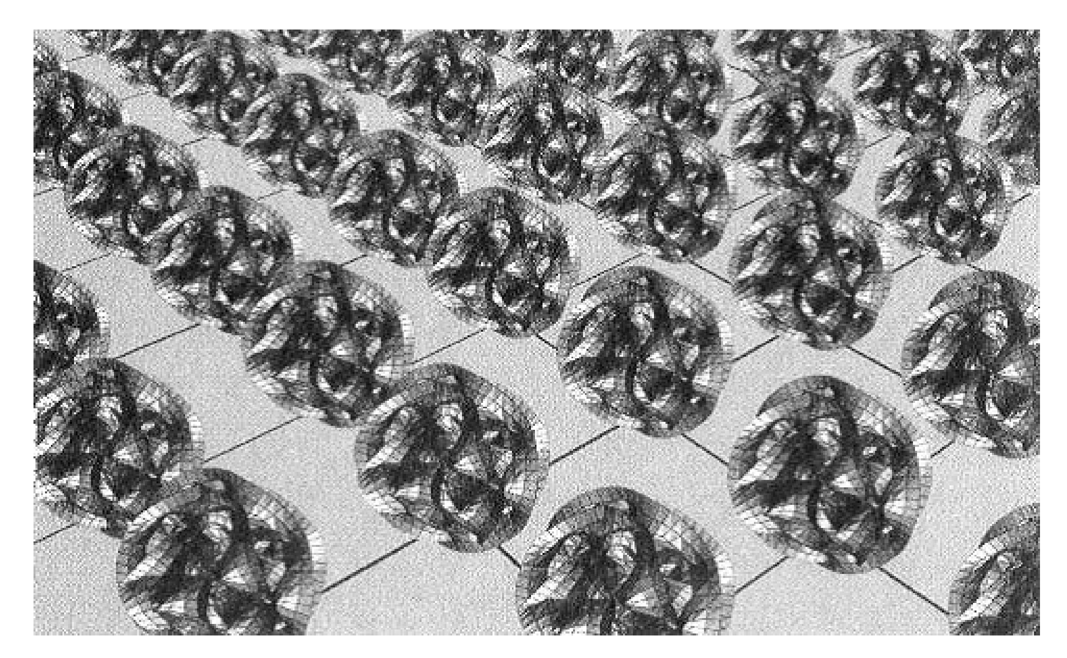


Figura 8.10 Según la teoría de cuerdas, el universo tiene dimensiones adicionales arrolladas en una forma de Calabi-Yau.

Ésta es una de las asombrosas características de la teoría de cuerdas. Sin embargo, si usted tiene una mente práctica, no tendrá más remedio que retroceder en esta discusión llevándola a un tema esencial y concreto. Ahora que tenemos una idea más concreta del aspecto que presentan las dimensiones adicionales, ¿cuáles son las propiedades físicas que se desprenden de la vibración de las cuerdas a través de dichas dimensiones y qué sucede cuando se comparan estas propiedades con las observaciones experimentales? Ésta es la pregunta del millón dentro de la teoría de cuerdas.

Capítulo 9

El rifle humeante: Firmas experimentales

Nada les gustaría más a los estudiosos de la teoría de cuerdas que presentar orgullosamente al mundo una lista de predicciones detalladas y experimentalmente comprobables. Ciertamente, es imposible afirmar que una teoría describe nuestro universo sin someter sus predicciones a una verificación experimental. Además, independientemente de la viveza con que la teoría de cuerdas pinte una imagen, si ésta no describe con precisión nuestro universo, toda esa teoría no tendrá más importancia que un elaborado juego de Dragones y Mazmorras.

A Edward Witten le gusta declarar que la teoría de cuerdas ha realizado ya una predicción experimentalmente confirmada y decisiva: «La teoría de cuerdas tiene la notable propiedad de *predecir la gravedad*».[67] Lo que Witten quiere decir con esto es que tanto Newton como Einstein desarrollaron teorías de la gravedad porque sus observaciones relativas al universo demostraban claramente que la gravedad existe y que, por consiguiente, requiere una explicación exacta y coherente. Por el contrario, un físico dedicado al estudio de la teoría de cuerdas —incluso aunque no supiera nada de la relatividad general— se vería conducido inexorablemente a esa teoría de la gravedad dentro del marco creado por las cuerdas. A través del patrón de vibración del gravitón (sin masa y con espín–2), la teoría de cuerdas tiene la gravedad completamente cosida dentro de su estructura teórica. Como ha dicho Witten: «El hecho de que la gravedad sea una consecuencia de la teoría de cuerdas es uno de los mayores avances teóricos de todos los tiempos».[68] Hay que reconocer que esta «predicción» es más bien una «posdicción», porque los físicos habían desarrollado descripciones teóricas de la gravedad antes de conocer la existencia de la teoría de cuerdas. Witten señala que esto es un mero accidente de los tantos que se han producido a lo largo de la historia. En otras civilizaciones avanzadas que existan en el universo, argumenta Witten con mucha fantasía, es bastante probable que la teoría de cuerdas se descubriera primero y que luego se descubriera la teoría de la gravedad como una consecuencia asombrosa de la primera.

Puesto que estamos confinados a la historia de la ciencia en nuestro planeta, hay

muchos que consideran esta posdicción de la gravedad como una confirmación experimental nada convincente de la teoría de cuerdas. La mayoría de los físicos se sentiría mucho más feliz con una de las dos cosas siguientes: una predicción seria de la teoría de cuerdas que pudiera confirmarse experimentalmente, o una posdicción de alguna propiedad del universo (como la masa del electrón o la existencia de tres familias de partículas) para la cual no existe actualmente explicación alguna. En este capítulo comentaremos hasta dónde han llegado los expertos en teoría de cuerdas por lo que respecta a la consecución de estos objetivos.

Irónicamente, veremos que, aunque la teoría de cuerdas tiene el potencial de para ser *la* teoría más predictiva que los físicos hayan estudiado jamás —una teoría que tiene la capacidad de explicar las propiedades más fundamentales de la naturaleza— los físicos no han podido hasta ahora ser capaces de hacer predicciones con la precisión necesaria para confrontarlas con los datos experimentales. Como un niño o una niña que reciben su regalo soñado en Navidad pero no pueden hacer que funcione porque faltan unas pocas páginas en el manual de instrucciones, los físicos de hoy en día están en posesión de lo que bien podría ser el Santo Grial de la ciencia moderna, pero no pueden dar rienda suelta a todo su poder predictivo hasta que consigan *escribir* el manual de instrucciones completo. Sin embargo, como comentaremos en este capítulo, con un poco de suerte, una característica fundamental de la teoría de cuerdas podría conseguir su verificación experimental durante la próxima década. Y, con muchísima más suerte, se podrían confirmar en cualquier momento algunas huellas digitales indirectas de esta teoría.

Fuego cruzado

¿Es correcta la teoría de cuerdas? No lo sabemos. Si está usted de acuerdo con la creencia de que las leyes de la física no se deberían fragmentar dividiéndolas en, por un lado, aquellas que gobiernan lo grande y, por otro, las que gobiernan lo pequeño; y si usted cree también que no deberíamos descansar hasta que tengamos una teoría cuyo ámbito de aplicación no tenga límites, la teoría de cuerdas es para usted la única apuesta posible por el momento. No obstante, se podría argumentar que esto sirve más para ilustrar la falta de imaginación de los físicos, que para justificar el carácter de única de la teoría de cuerdas. Quizá sea así. Además, se podría añadir que, como el hombre que busca en la calle únicamente a la luz de una farola las llaves que ha perdido, los físicos están apiñados en torno a la teoría de cuerdas sólo porque los caprichos de la historia de la ciencia han proyectado al azar un rayo de luz en esta

dirección. Puede ser. Y, si usted es relativamente conservador o aficionado a hacer de abogado del diablo, podría decir incluso que los físicos no tienen por qué perder el tiempo con una teoría que propone una nueva característica de la naturaleza que es algunos cientos de miles de billones de veces más pequeña que cualquier cosa que podamos sondear experimentalmente de una manera directa.

Si usted hubiera proclamado a los cuatro vientos estas quejas en la década de 1980, cuando la teoría de cuerdas causó sensación por primera vez, se hubieran unido a su voz las de algunos de los físicos más respetables de nuestros tiempos. Por ejemplo, a mediados de esa década, Sheldon Glashow, físico de Harvard y ganador del premio Nobel, junto con Paul Ginsparg, también físico de Harvard, menospreciaron públicamente la falta de accesibilidad experimental de la teoría de cuerdas:

> En lugar de la confrontación tradicional entre la teoría y las pruebas experimentales, los investigadores de la teoría de cuerdas persiguen una armonía interna, donde la elegancia, la unicidad y la belleza definen la verdad. Para su existencia, esta teoría depende de coincidencias mágicas, de cancelaciones milagrosas y de relaciones entre campos de la matemática aparentemente no relacionados (y posiblemente aún no descubiertos). ¿Son estas propiedades razón suficiente para aceptar la realidad de las supercuerdas? ¿Es que las matemáticas y la estética pueden suplantar y trascender el mero experimento?[69]

En algún otro lugar, Glashow continuaba su discurso diciendo:

> La teoría de las supercuerdas es tan ambiciosa que sólo puede ser del todo correcta o del todo equivocada. El único problema es que sus matemáticas son tan nuevas y tan difíciles que durante varias décadas no sabremos cuáles son.[70]

Él incluso ponía en cuestión si los expertos en teoría de cuerdas deberían «estar pagados por los departamentos de física y tener autorización para pervertir a los estudiantes impresionables», advirtiendo de que la teoría de cuerdas estaba minando la ciencia, al igual que lo hacía la teología medieval durante la Edad Media.[71]

Richard Feynman, poco antes de morir, dejó claro que él no creía que la teoría de cuerdas fuera la cura *única* para los problemas —en particular, los perniciosos infinitos— que obstaculizan una fusión armoniosa de la gravedad y la mecánica cuántica:

> Mi intuición ha sido —y puede que me equivoque— que hay más de un modo de quitarle la piel a un gato. No creo que exista sólo un modo de librarse de los infinitos. El hecho de que una teoría consiga librarse de ellos no me parece razón suficiente para creer en su unicidad.[72]

Y Howard Georgi, el eminente colega y colaborador de Glashow en Harvard, era también un vociferante crítico de las cuerdas a finales de la década de 1980:

> Si dejamos que nos engañe ese canto de sirena de la «definitiva» unificación a distancias tan pequeñas que nuestros amigos los investigadores experimentales no pueden hacer nada con ellas, nos veremos metidos en dificultades, porque perderemos ese proceso crucial de eliminación de ideas irrelevantes que distingue a la física de tantas otras actividades humanas menos interesantes.[73]

Como sucede con muchos temas de gran importancia, por cada uno de estos detractores hay un partidario entusiasta. Witten ha dicho que cuando se enteró de que la teoría de cuerdas incorpora la gravedad y la mecánica cuántica, eso fue «la mayor emoción intelectual» de toda su vida.[74] Cumrun Vafa, de la Universidad de Harvard y un experto puntero en teoría de cuerdas, ha dicho que «la teoría de cuerdas revela de una manera definitiva el conocimiento más profundo del universo que jamás se haya tenido».[75] Y Murray Gell-Mann, ganador del premio Nobel, ha dicho que la teoría de cuerdas es «una cosa fantástica» y que espera que alguna versión de dicha teoría será algún día la teoría del universo en su globalidad.[76]

Como se puede ver, este debate está siendo alimentado en parte por la física y en parte por varias filosofías que tratan de cómo se ha de hacer la física. Los «tradicionalistas» desean que el trabajo teórico esté estrechamente ligado a la observación experimental, en gran parte siguiendo el molde de la investigación de los últimos siglos, que produjo tantos éxitos. Pero, otros piensan que estamos preparados para abordar cuestiones que están más allá de nuestra capacidad tecnológica actual para comprobarlas directamente.

A pesar de las diferentes filosofías, durante la última década se han apaciguado muchas de las actitudes críticas con respecto a la teoría de cuerdas. Glashow atribuye esto a dos causas. En primer lugar, observa que, a mediados de la década de 1980,

> Los expertos en teoría de cuerdas proclamaban con entusiasmo y de una manera exuberante que en breve responderían a todos los interrogantes planteados dentro de la física. Debido a que actualmente son más prudentes

con su entusiasmo, buena parte de mis críticas de la década de 1980 han ido perdiendo importancia.[77]

En segundo lugar, señala también lo siguiente:

> Nosotros, los que no nos dedicamos a la teoría de cuerdas, no hemos hecho prácticamente ningún progreso durante la última década. Por lo tanto, el argumento de que la teoría de cuerdas es la única apuesta posible por el momento es muy fuerte y poderoso. Hay preguntas a las que no se dará respuesta en el marco de la teoría cuántica de campos convencional. Hasta aquí la cosa está clara. Puede que la respuesta la dé alguna otra teoría, y la única otra que conozco es la teoría de cuerdas.[78]

Georgi reflexiona retrospectivamente sobre la década de 1980 de una forma muy parecida:

> A la teoría de cuerdas, durante sus primeros años de historia, se le hizo en varias ocasiones una propaganda excesiva. Durante los años intermedios he descubierto que algunas de las ideas de la teoría de cuerdas han conducido a modos interesantes de pensar sobre la física que me han resultado útiles en mi propio trabajo. Me siento mucho más feliz ahora, viendo cómo la gente dedica su tiempo a la teoría de cuerdas, porque ahora puedo ver cómo saldrá de ella algo útil.[79]

El físico teórico David Gross, un líder tanto en física convencional como en la física de las cuerdas, resumió elocuentemente la situación de la siguiente manera:

> Solía suceder que, cuando estábamos escalando la montaña de la naturaleza, los físicos experimentales marcaban el camino. Los lentos teóricos nos quedábamos rezagados detrás. De vez en cuando, ellos lanzaban hacia abajo de una patada una piedra experimental que nos rebotaba en las cabezas. Eventualmente tomábamos la idea y seguíamos el camino que habían abierto los físicos experimentales. Cuando nos reuníamos por fin con nuestros amigos, les explicábamos cómo era la vista y cómo llegaron ellos allí. Éste era el modo viejo y fácil (al menos para los teóricos) de escalar la montaña. Todos nosotros anhelamos el retorno de aquellos días. Pero ahora los teóricos podríamos tener que tomar el liderazgo. Ésta es una empresa mucho más solitaria.[80]

Los expertos en teoría de cuerdas no desean realizar una expedición solitaria hasta las cotas más altas del monte de la Naturaleza; preferirían, con mucho, compartir la carga y la emoción con sus colegas los físicos experimentales. Se trata meramente de que hay un desencaje tecnológico en nuestra situación actual —una asincronía histórica— que las sogas y las grampas teóricas se han modificado parcialmente para el ascenso a la cima, mientras que las experimentales no existen aún. Sin embargo, esto *no* significa que la teoría de cuerdas esté fundamentalmente divorciada de los experimentos. Al contrario, los expertos en teoría de cuerdas tienen grandes esperanzas de «patear hacia abajo una piedra *teórica*», desde la cima de una montaña de altísima energía hacia los experimentalistas que trabajan más abajo. Éste es el objetivo primordial de la investigación actual en teoría de cuerdas. Hasta ahora no se ha desprendido ninguna piedra de la cima para lanzarla hacia abajo golpeando lo que encuentre, pero, como ya hemos comentado, unos pocos, tentadores y promisorios guijarros ciertamente han caído.

El camino al experimento

Si no se producen unos avances tecnológicos monumentales, nunca seremos capaces de situarnos en las escalas de longitud diminuta que son necesarias para ver directamente una cuerda. Los físicos pueden sondear hasta una millonésima de billonésima de metro mediante unos aceleradores de partículas cuyo tamaño es de unos cuantos kilómetros. El sondeo de distancias aún menores requiere mayores energías y esto significa aparatos de mayor tamaño capaces de dirigir esta energía hacia una sola partícula. Dado que la longitud de Planck es aproximadamente 17 órdenes de magnitud menor que las longitudes a las que ahora mismo podemos acceder, utilizando la tecnología actual necesitaríamos un acelerador del tamaño de la galaxia para ver las cuerdas de una en una. De hecho, Shmuel Nussinov de la Universidad de Tel Aviv ha demostrado que esta estimación aproximada basada en ajustes sencillos es probablemente demasiado optimista; el estudio realizado por él es más minucioso e indica que necesitaríamos un acelerador del tamaño de todo el *universo* (La energía que se requiere para sondear la materia a la longitud de Planck es aproximadamente igual a mil kilovatios hora —la energía necesaria para mantener en funcionamiento un aparato normal de aire acondicionado durante alrededor de cien horas— y esto no es nada extraterrestre. El desafío tecnológico que aparentemente resulta insuperable es concentrar toda esta energía en una única partícula, es decir, en una sola cuerda). Dado que el Congreso de Estados Unidos canceló hace poco los

fondos para el *Superconducting Supercollider* (Supercolisionador Superconductor) —un acelerador de partículas de «sólo» 54 millas de circunferencia— no vamos a contener la respiración mientras esperamos el dinero para un acelerador de sondeos a escalas de la longitud de Planck. Si queremos comprobar la teoría de cuerdas experimentalmente, habrá de hacerse de una forma indirecta. Tendremos que determinar las implicaciones físicas de la teoría de cuerdas que se puedan observar a escalas de longitud mucho mayores que el tamaño de una cuerda.[81]

En su innovadora publicación, Candelas, Horowitz, Strominger y Witten dieron el primer paso hacia este objetivo. No sólo descubrieron que las dimensiones adicionales utilizadas en la teoría de cuerdas han de estar arrolladas en una forma de Calabi-Yau, sino que también dedujeron algunas de las consecuencias que esto tiene para los posibles patrones de vibraciones de cuerdas. Un resultado fundamental hallado por estos científicos ilustra las soluciones sorprendentemente inesperadas que la teoría de cuerdas ofrece para ciertos problemas planteados desde hace mucho tiempo en la física de partículas.

Recordemos que las partículas elementales que los físicos habían descubierto se encuadraban en tres familias de idéntica organización, de tal forma que las partículas de una familia tenían siempre más masa que las partículas de la anterior. La enigmática pregunta para la que, antes de llegar la teoría de cuerdas, no había respuesta era: ¿por qué *familias* y por qué *tres*? He aquí lo que propone la teoría de cuerdas. Una forma típica de Calabi-Yau contiene *huecos* que son análogos a los que se pueden ver en un disco de fonógrafo, o en una rosquilla, o en una «multirrosquilla», como se muestra en la Figura 9.1. En el contexto de dimensión superior de las formas de Calabi-Yau existe en realidad toda una variedad de tipos diferentes de agujeros que pueden aparecer —agujeros que pueden tener también ellos mismos una variedad de dimensiones («agujeros multidimensionales»)— pero la Figura 9.1 expresa la idea básica. Candelas, Horowitz, Strominger y Witten examinaron minuciosamente el efecto que estos agujeros producen en los posibles patrones de vibración de cuerdas, y he aquí lo que descubrieron.

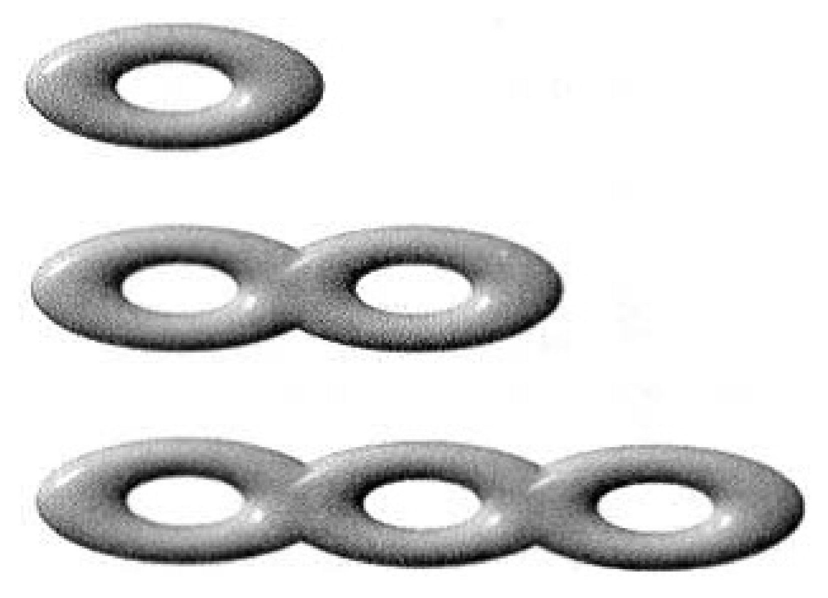


Figura 9.1 Una rosquilla, o toro, y sus primos de varias asas.

Hay una *familia* de vibraciones de energía mínima de las cuerdas asociada con cada *agujero* en la porción de Calabi-Yau del espacio. Debido a que las partículas elementales de esta familia deben corresponder a los modelos oscilatorios de energía mínima, la existencia de una multiplicidad de agujeros —algo así como los de la multirrosquilla— significa que los patrones de vibraciones de las cuerdas se encuadrarán en una multiplicidad de familias. Si la arrollada forma de Calabi-Yau tiene tres agujeros, entonces hallaremos tres familias de partículas elementales.[82] Y por ende, la teoría de cuerdas afirma que la organización en familias observada experimentalmente, en vez de ser una característica inexplicable de origen aleatorio o divino, ¡es reflejo del número de agujeros que haya en la forma geométrica que cuenta con dimensiones adicionales! Éste es el tipo de resultado que hace que el corazón de un físico dé un vuelco.

Se podría pensar que el número de agujeros en esas dimensiones arrolladas a escala de la longitud de Planck —la cumbre de la física, *por excelencia*— ha hecho rodar ahora una piedra experimentalmente comprobable, llevándola hacia las energías accesibles. Después de todo, los físicos experimentalistas pueden determinar —de hecho, ya lo han determinado— el número de familias de partículas: 3. Por desgracia, el número de agujeros que están contenidos en cada una de las decenas de miles de formas conocidas de Calabi-Yau recorre una amplia gama de valores. Algunas formas tienen 3, pero otras tienen 4, 5, 25, etc. —algunas llegan a tener incluso 480 agujeros —. *El problema es que por ahora nadie sabe cómo deducir a partir de las ecuaciones de la teoría de cuerdas cuáles de las formas de Calabi-Yau constituyen las dimensiones espaciales adicionales*. Si pudiéramos descubrir el principio que permite seleccionar una forma de Calabi-Yau entre las numerosas posibilidades existentes, entonces, por supuesto, una piedra de la cumbre de la física caería al campo de los físicos experimentalistas. Si la forma concreta de Calabi-Yau seleccionada mediante

las ecuaciones teóricas tuviera tres agujeros, habríamos hallado una posdicción importante de la teoría de cuerdas que explica una conocida característica del universo, que de otra forma resultaría ser un misterio total. Pero, el hallazgo del principio para elegir entre las formas de Calabi-Yau es un problema que hasta ahora sigue sin resolverse. Sin embargo —y ésta es la cuestión importante—, vemos que la teoría de cuerdas proporciona la posibilidad de dar respuesta a este misterio básico de la física de partículas, y esto en sí mismo ya es un progreso sustancial.

El número de familias no es sino una consecuencia experimental de la forma geométrica de las dimensiones adicionales. Por sus efectos sobre posibles patrones de vibraciones de cuerdas, otras consecuencias de las dimensiones adicionales son, entre otras, las propiedades detalladas de las partículas de las fuerzas y de la materia. Como ejemplo básico, los posteriores trabajos de Strominger y Witten demostraron que las masas de las partículas de cada familia dependen del modo en que intersecciones y se superpongan entre sí las fronteras de los distintos agujeros multidimensionales de la forma de Calabi-Yau. Es difícil visualizarlo, pero la idea es que cuando las cuerdas vibran a través de las dimensiones adicionales arrolladas, la disposición precisa de los distintos agujeros y el modo en que la forma de Calabi-Yau se repliega alrededor de ellos produce un impacto directo en los posibles patrones resonantes de vibración. Aunque los detalles son difíciles de seguir y no son realmente tan esenciales, lo importante es que, como en el caso del número de familias, la teoría de cuerdas es capaz de dotarnos de un marco en el que se pueda responder preguntas —tales como por qué el electrón y otras partículas tienen las masas que tienen— que en anteriores teorías estaban totalmente silenciadas. Sin embargo, una vez más, la realización de estos cálculos requiere que sepamos qué espacio de Calabi-Yau se ha de tomar para las dimensiones adicionales.

La discusión anterior nos da cierta idea de cómo la teoría de cuerdas podrá algún día explicar las propiedades de las partículas de la materia que figuran en la Tabla 1.1. Los expertos en teoría de cuerdas creen que una historia similar explicará algún día también las propiedades de las partículas mensajeras de las fuerzas fundamentales, que se detallan en la Tabla 1.2. Es decir, cuando las cuerdas se retuercen y vibran mientras describen meandros a través de las dimensiones extendidas y arrolladas, un pequeño subconjunto de su amplio repertorio oscilatorio está formado por vibraciones con un espín igual a 1 ó 2. Éstos son los posibles estados vibratorios de las cuerdas que transportan fuerzas. Independientemente de la forma del espacio de Calabi-Yau, siempre existe un patrón vibratorio que no tiene masa y tiene espín–2; este modelo lo identificamos con el gravitón. Sin embargo, la lista exacta de partículas mensajeras con espín–1 —su número, la intensidad de la fuerza que transmiten, las simetrías *gauge* que respetan— depende crucialmente de la forma geométrica precisa de las dimensiones arrolladas. Así, una vez más; llegamos a

constatar que la teoría de cuerdas proporciona un marco para explicar el contenido de partículas mensajeras que se observa en nuestro universo, es decir, para explicar las propiedades de las fuerzas fundamentales, pero sin saber exactamente en qué forma de Calabi-Yau están arrolladas las dimensiones adicionales, no podemos hacer ninguna predicción o posdicción definitiva (aparte de la observación de Witten relativa a la posdicción de la gravedad).

¿Por qué no podemos averiguar cuál es la forma de Calabi-Yau «correcta»? La mayoría de los expertos en teoría de cuerdas echan la culpa de esto a la falta de adecuación de las herramientas teóricas que se utilizan actualmente para analizar la teoría de cuerdas. Como explicaremos con algo más de detalle en el capítulo 12, el marco matemático de la teoría de cuerdas es tan complicado que los físicos sólo han sido capaces de realizar cálculos aproximados a través de un formalismo conocido como *teoría de la perturbación*. Dentro de este esquema de aproximación, cada forma posible de Calabi-Yau parece estar en pie de igualdad con cualquier otra; ninguna se destaca fundamentalmente a partir de las fórmulas. Además, dado que las consecuencias físicas de la teoría de cuerdas dependen en gran manera de la forma exacta de las dimensiones arrolladas, si no se es capaz de seleccionar un espacio de Calabi-Yau entre los muchos existentes, no se puede sacar ninguna conclusión definitiva que sea experimentalmente comprobable. Una fuerte tendencia que impulsa la investigación actual es el desarrollo de métodos teóricos que transciendan el planteamiento aproximado, con la esperanza de que, entre otros resultados positivos, nos conduzcan a una forma de Calabi-Yau única para las dimensiones adicionales. En el capítulo 13 comentaremos los avances realizados en estas líneas.

Agotando las posibilidades

Llegando a este punto, podríamos preguntarnos: a pesar de que hasta ahora no podemos deducir qué forma de Calabi-Yau elige la teoría de cuerdas, ¿existe *alguna* opción de la que se desprendan propiedades físicas coincidentes con lo que observamos? En otras palabras, si desarrolláramos las correspondientes propiedades físicas asociadas con todas y cada una de las formas de Calabi-Yau y las recogiéramos en un catálogo gigantesco, ¿encontraríamos alguna que se correspondiera con la realidad? Ésta es una pregunta importante, pero dos razones principales es también una difícil de responder completamente.

Una manera sensata de empezar es centrarnos sólo en aquellas formas de Calabi-Yau que dan lugar a tres familias. Esto recorta considerablemente la lista de opciones

viables, aunque muchas se mantienen. De hecho, obsérvese que podemos deformar una rosquilla múltiple, haciéndola cambiar de una forma a un enorme número de otras —en realidad a una variedad infinita— sin cambiar el número de agujeros que contiene. En la Figura 9.2 representamos una de estas deformaciones de la forma que aparece en la parte inferior de la Figura 9.1.

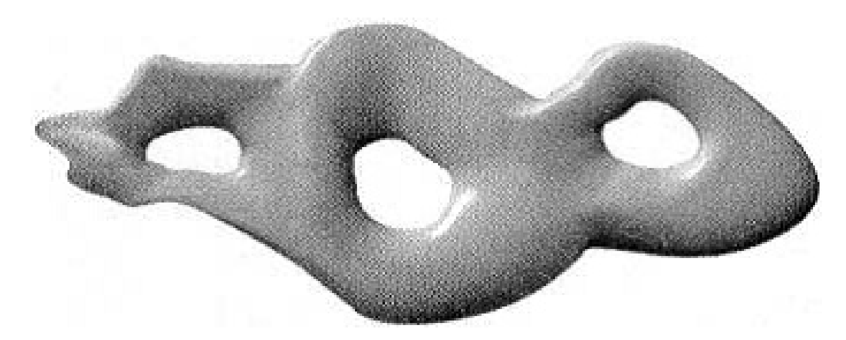


Figura 9.2 La forma de una rosquilla de múltiples asas se puede deformar de muchas maneras, una de las cuales se representa aquí, sin cambiar el número de agujeros que contiene.

De una manera similar, podemos comenzar con un espacio de Calabi-Yau de tres agujeros y deformar suavemente su forma sin cambiar el número de agujeros, pasando por una sucesión infinita de formas. (Cuando mencionábamos anteriormente que existían decenas de miles de formas de Calabi-Yau, estábamos ya agrupando todas aquellas formas que se pueden cambiar unas por otras mediante tales deformaciones suaves y considerábamos todo el grupo como un solo espacio de Calabi-Yau). El problema es que las propiedades físicas de las vibraciones de cuerdas, sus masas y sus respuestas a la acción de las fuerzas *están* afectadas en gran medida por estos cambios de forma, pero, una vez más, no tenemos modo de seleccionar una posibilidad para considerarla mejor que otra. Además, independientemente de cuántos estudiantes graduados puedan poner a trabajar los profesores de física, no es posible en ningún caso descifrar las propiedades físicas que corresponden a una lista infinita de formas diferentes.

Esta constatación ha conducido a los expertos en teoría de cuerdas a examinar las propiedades físicas resultantes de una muestra de formas posibles de Calabi-Yau. Sin embargo, incluso en esto, la vida no resulta fácil. Las ecuaciones aproximadas que utiliza actualmente la teoría de cuerdas no son lo bastante potentes para desarrollar completamente las propiedades físicas resultantes para una forma alternativa de Calabi-Yau dada. Puede haber todavía un largo camino hasta llegar a comprender, aunque sólo sea en una estimación aproximada, las propiedades de las vibraciones de cuerdas que esperamos que se correspondan con las partículas observadas. Pero unas conclusiones físicas precisas y definitivas, como la masa del electrón o la intensidad de la fuerza débil, requieren unas ecuaciones mucho más exactas que el actual marco aproximado. Recordemos el capítulo 6 —y el ejemplo del *Precio justo*— donde se

decía que la escala de energía «natural» de la teoría de cuerdas es la energía de Planck, y que sólo mediante anulaciones mutuas extremadamente delicadas produce la teoría de cuerdas unos patrones vibratorios cuyas masas están muy cercanas a las de las partículas de materia y de fuerza conocidas. Las anulaciones mutuas son delicadas y requieren unos cálculos precisos, porque incluso los errores pequeños tienen un profundo impacto en la exactitud. Como explicaremos en el capítulo 12, a mediados de la década de 1990 los físicos obtuvieron avances significativos hacia el objetivo de transcender las actuales ecuaciones aproximadas, aunque todavía hay que ir mucho más lejos.

Entonces, ¿en qué etapa nos encontramos? Bueno, pues incluso con el escollo de no tener criterios básicos para elegir una forma de Calabi-Yau en vez de otra, así como no disponer de las herramientas teóricas necesarias para extraer plenamente las consecuencias observables de dicha elección, nos podemos preguntar si alguna de las opciones del catálogo de Calabi-Yau da lugar a un universo que esté al menos aproximadamente de acuerdo con la observación. La respuesta a esta pregunta es bastante alentadora. Aunque la mayoría de las entradas del catálogo de Calabi-Yau dan lugar a consecuencias observables significativamente diferentes de lo que vemos en nuestro universo (diferentes números de familias de partículas, diferentes números y tipos de fuerzas fundamentales, entre otras desviaciones sustanciales), unos pocos elementos del catálogo producen una física que es cualitativamente cercana a lo que observamos en la realidad. Es decir, *existen* ejemplos de espacios de Calabi-Yau que, cuando se eligen para las dimensiones arrolladas que requiere la teoría de cuerdas, dan lugar a unas vibraciones de cuerdas que son muy parecidas a las partículas del modelo estándar. Además, algo de suma importancia, la teoría de cuerdas consigue que la fuerza de la gravedad se incorpore a este marco regido por la mecánica cuántica.

Con nuestro nivel actual de conocimientos, esta situación es la mejor que podríamos haber esperado. Si muchas de las formas de Calabi-Yau coincidieran aproximadamente con los experimentos, el vínculo entre una opción específica y las propiedades físicas que observamos sería menos apremiante. Muchas opciones podrían encajar con lo esperado y, por consiguiente, no habría que seleccionar ninguna específicamente, ni siquiera desde una perspectiva experimental. Por otra parte, si ninguna de las formas de Calabi-Yau se acercara ni siquiera remotamente a producir las propiedades físicas observadas, parecería que la teoría de cuerdas, aun siendo un bello marco teórico, podría no tener relevancia alguna para nuestro universo. Es un resultado enormemente alentador encontrar un pequeño número de formas de Calabi-Yau que, dentro de los límites de nuestra capacidad actual, bastante tosca, para determinar implicaciones físicas detalladas, parecen estar dentro del ámbito de la aceptabilidad.

Explicar las propiedades elementales de la materia y de las partículas de fuerza constituiría uno de los más grandes logros científicos —si no *el mayor* de todos—. Sin embargo, podríamos preguntamos si existen *pre*dicciones teóricas relativas a las cuerdas —como opuestas a las *posdicciones*— que los físicos experimentales pudieran intentar confirmar, ya sea ahora o en un futuro previsible. Sí, existen.

Superpartículas

Los obstáculos teóricos que actualmente nos impiden extraer predicciones detalladas relativas a las cuerdas nos obligan a buscar aspectos *genéricos*, en vez de específicos, de un universo formado por cuerdas. Genérico en este contexto se refiere a unas características que resultan tan fundamentales para la teoría de cuerdas que son en gran medida indiferentes, si no completamente independientes, con respecto a aquellas propiedades detalladas de la teoría que están ahora fuera de nuestro alcance teórico. Estas características se pueden discutir tranquilamente, aunque se tenga un conocimiento incompleto de la teoría en su globalidad. En próximos capítulos volveremos a otros ejemplos, pero por ahora nos centraremos en uno: la supersimetría.

Como ya hemos comentado, una propiedad fundamental de la teoría de cuerdas es la de ser altamente simétrica, incluyendo no sólo principios simétricos intuitivos, sino respetando, asimismo, la extensión matemática máxima de dichos principios, la supersimetría. Esto significa, como se comentó en el capítulo 7, que los modelos de vibración de cuerdas se presentan a pares —pares de superparejas— y con una diferencia entre unos y otros de media unidad de espín. Si la teoría de cuerdas es correcta, entonces algunas de las vibraciones de cuerdas corresponderán a las partículas elementales conocidas. Debido al emparejamiento supersimétrico, la teoría de cuerdas hace la *predicción* de que cada partícula conocida tendrá una superpareja. Podemos determinar las cargas de fuerza que cada una de las partículas que constituyen superparejas debería transportar, pero actualmente no tenemos capacidad para predecir sus masas. Aun así, la predicción de que *existen* las superparejas es una característica genérica de la teoría de cuerdas; se trata de una propiedad de la teoría de cuerdas que es cierta, independientemente de los aspectos de la teoría que aún no hemos descifrado.

Nunca se han observado superparejas de las partículas elementales conocidas. Esto podría significar que no existen y que la teoría de cuerdas está equivocada. Sin embargo, muchos físicos de partículas piensan que lo que significa es que las

superparejas tienen un gran peso y por lo tanto están más allá de nuestras posibilidades de observarlas experimentalmente. Ahora los físicos están construyendo un gigantesco acelerador de partículas en Ginebra, Suiza, llamado el Gran Colisionador de Hadrones. Hay grandes esperanzas de que este aparato sea lo suficientemente potente como para descubrir las partículas que constituyen superparejas. Este acelerador ha de estar listo para entrar en funcionamiento antes del año 2010, y poco después de esto la supersimetría se podría confirmar experimentalmente. Como Schwarz ha dicho: «No debería tardarse demasiado tiempo en descubrir la supersimetría. Y, cuando eso suceda, será impresionante».[83]

No obstante, deberíamos tener presentes dos cosas. Incluso si se descubren las partículas que constituyen las superparejas, este hecho por sí solo no determinará que la teoría de cuerdas es correcta. Como ya hemos visto, aunque la supersimetría se descubrió estudiando la teoría de cuerdas, también se ha incorporado con éxito a las teorías sobre partículas puntuales, por lo tanto no está confinada a sus orígenes cuérdicos. A la inversa, aunque el Gran Colisionador de Hadrones no descubra las partículas que constituyen superparejas, este hecho por sí solo no excluye la teoría de cuerdas, ya que podría ser que las superparejas tuvieran tanto peso que estuvieran también fuera del alcance de este aparato.

Dicho esto, si realmente se descubren las partículas que constituyen superparejas, existiría de la forma más definitiva una emocionante y poderosa prueba circunstancial de la autenticidad de la teoría de cuerdas.

Partículas con carga fraccionaria

Otro sello distintivo experimental de la teoría de cuerdas, que estaría relacionado con la carga eléctrica, es en cierto modo menos genérico que las partículas constituyentes de las superparejas, pero igualmente impresionante. Las partículas elementales del modelo estándar tienen una gama muy limitada de cargas eléctricas: los quarks y los antiquarks tienen cargas eléctricas de un tercio o dos tercios, y sus negativas correspondientes, mientras que las otras partículas tienen cargas eléctricas de valores cero, uno, o uno negativo. Las combinaciones de estas partículas constituyen toda la materia conocida del universo. Sin embargo, en la teoría de cuerdas es posible que existan patrones vibratorios resonantes correspondientes a partículas que tienen cargas eléctricas significativamente diferentes. Por ejemplo, la carga eléctrica de una partícula puede tomar valores fraccionarios exóticos como 1/5, 1/11, 1/13 ó 1/53, entre muchos otros valores posibles. Estas cargas inusuales pueden darse si las

dimensiones arrolladas cumplen cierta propiedad geométrica: presentar agujeros con la peculiar propiedad de que las cuerdas que los circunscriben sólo pueden desenmarañarse ellas mismas si dan vueltas un número determinado de veces.[84] Los detalles al respecto no son especialmente importantes, pero resulta que el número de vueltas necesarias para desenmarañarse se pone de manifiesto en los patrones de vibración permitidos sin más que determinar el denominador de las cargas fraccionarias.

Algunas formas de Calabi-Yau tienen esta propiedad geométrica, mientras que otras no la tienen, y por esta razón la posibilidad de fracciones de carga eléctrica inusuales no es tan genérica como la existencia de partículas superparejas. Por otra parte, mientras que la predicción de superparejas no es una propiedad única de la teoría de cuerdas, décadas de experiencia han demostrado que no hay ninguna razón por la que obligatoriamente dichas fracciones exóticas de carga eléctrica tengan que existir en *cualquier* teoría de partículas puntuales. Se podrían introducir a la fuerza en cualquier teoría de partículas puntuales, pero eso sería tan natural como meter un elefante en una tienda de porcelanas. El hecho de que estas cargas eléctricas inusuales pudieran surgir a partir de unas sencillas propiedades geométricas que las dimensiones adicionales puedan tener, hace que dichas cargas sean un sello distintivo experimental natural de la teoría de cuerdas.

Lo mismo que sucede con las superparejas, nunca se ha observado ninguna de estas partículas provistas de cargas exóticas, y nuestros conocimientos relativos a la teoría de cuerdas no nos permiten obtener una predicción definitiva de sus masas, en el caso de que las dimensiones adicionales tuvieran las propiedades adecuadas para generar dichas masas. Una razón que explicaría por qué no se ven es que, si realmente existen, sus masas deben desbordar la capacidad de nuestros medios tecnológicos actuales —de hecho, es probable que sus masas sean del orden de la masa de Planck—. No obstante, si en el futuro algún experimento detectara estas cargas eléctricas exóticas, esto constituiría una prueba muy fuerte en el sentido de demostrar que la teoría de cuerdas es correcta.

Algunas conjeturas más lejanas

Sin embargo, existen otras vías mediante las cuales se podrían descubrir pruebas de la autenticidad de la teoría de cuerdas. Por ejemplo, Witten ha apuntado la posibilidad, en un plano más lejano, de que los astrónomos pudieran ver algún día un sello distintivo directo de la teoría de cuerdas en los datos que obtienen observando los

cielos. Como ya se vio en el capítulo 6, la medida de una cuerda es habitualmente la longitud de Planck, pero las cuerdas más energéticas pueden alcanzar un tamaño sustancialmente mayor. De hecho, la energía del *big bang* habría sido suficientemente alta para producir unas pocas cuerdas macroscópicamente grandes que, a través de la expansión cósmica, podrían haber llegado a alcanzar escalas astronómicas. Podemos imaginarnos que ahora o en algún momento del futuro, una cuerda de este tipo podría atravesar el cielo nocturno, dejando una huella inconfundible y medible en los datos recogidos por los astrónomos (como, por ejemplo, un pequeño desplazamiento en la temperatura media de las microondas cósmicas; véase el capítulo 14). Como dice Witten: «Aunque algo fantasioso, éste es mi escenario favorito para confirmar la teoría de cuerdas, puesto que nada plantearía el tema tan espectacularmente como la visión de una cuerda mediante un telescopio».[85]

Más cercanos a la Tierra, se han propuesto otros posibles sellos distintivos experimentales de la teoría de cuerdas. He aquí cinco ejemplos. En primer lugar, a propósito de la Tabla 1.1, ya habíamos indicado que no sabemos si los neutrinos son precisamente muy ligeros o, de hecho, tienen exactamente una masa nula. Según el modelo estándar, no tienen masa, pero esto no se debe a ninguna razón particularmente profunda. Uno de los desafíos que se plantea a la teoría de cuerdas consiste en aportar una explicación irrefutable de los datos presentes y futuros relativos a los neutrinos, especialmente si los experimentos demuestran por fin que los neutrinos poseen una masa muy pequeña, pero no nula. En segundo lugar, hay ciertos procesos hipotéticos que el modelo estándar prohíbe, pero que pueden estar permitidos por la teoría de cuerdas. Uno de ellos es la posible desintegración del protón (no hay que alarmarse; esta desintegración, si fuera cierta, se produciría muy lentamente) y otros son las posibles transmutaciones y desintegraciones de varias combinaciones de quarks, en violación de ciertas propiedades, aceptadas desde hace tiempo, de la teoría cuántica de campos aplicada a las partículas puntuales.[86] Estos tipos de procesos son especialmente interesantes porque su ausencia de la teoría convencional los convierte en señales sensibles de que no se puede explicar la física sin invocar nuevos principios teóricos. Si se llegaran a observar, cualquiera de estos procesos proporcionaría un campo abonado para que la teoría de cuerdas ofreciera una explicación. El tercer ejemplo es que, para ciertas formas de Calabi-Yau, existen patrones particulares de vibración de cuerdas que pueden aportar de una manera efectiva nuevos campos de fuerzas diminutos y de largo alcance. Si se descubrieran los efectos de alguna de estas nuevas fuerzas, es posible que reflejaran algunas de las nuevas propiedades físicas de la teoría de cuerdas. El cuarto ejemplo, como indicamos en el capítulo próximo, dice que los astrónomos han recogido pruebas de que nuestra galaxia, y posiblemente todo el universo, están inmersos en un baño de *materia oscura*, cuya identidad aún no se ha determinado. Mediante sus muchos

patrones posibles de vibración resonante, la teoría de cuerdas sugiere cierto número de candidatos que podrían ser la materia oscura; el veredicto sobre estos candidatos tendrá que esperar a futuros resultados experimentales que establezcan las propiedades detalladas de la materia oscura.

Y finalmente, una quinta posibilidad de conectar la teoría de cuerdas con las observaciones experimentales involucra la constante cosmológica —recuérdese que, como ya se comentó en el capítulo 3, se trata de la modificación que impuso Einstein temporalmente a sus ecuaciones originales de la relatividad general para garantizar un universo estático—. Aunque el subsiguiente descubrimiento de que el universo está en expansión obligó a Einstein a retirar dicha modificación, posteriormente los físicos han constatado que no hay explicación para el motivo por el cual la constante cosmológica tendría que ser cero. De hecho, la constante cosmológica se puede interpretar como una especie de energía global almacenada en el vacío del espacio, y por consiguiente su valor tendría que ser calculable teóricamente y medible experimentalmente. Pero, hasta la fecha, tales cálculos y mediciones conducen a una contradicción colosal: las observaciones muestran que la constante cosmológica es, o bien cero (como sugirió finalmente Einstein), o bastante pequeña; los cálculos indican que las fluctuaciones desde el punto de vista de la mecánica cuántica en el espacio vacío tienden a *generar* una constante cosmológica distinta de cero cuyo valor es alrededor de 120 órdenes de magnitud (un 1 seguido de 120 ceros) mayor que lo que el experimento permite. Esto presenta un maravilloso desafío y una maravillosa oportunidad a los especialistas en teoría de cuerdas: ¿pueden los cálculos en la teoría de cuerdas mejorar esta situación de contradicción y explicar por qué la constante cosmológica es cero?, o, si los experimentos establecen definitivamente que este valor es pequeño pero distinto de cero, ¿puede la teoría de cuerdas proporcionar una explicación? Si los especialistas en teoría de cuerdas son capaces de superar este desafío —hasta ahora no lo son— esto aportaría una prueba irrebatible en apoyo de la teoría.

Una valoración

La historia de la física está llena de ideas que cuando se presentaron por primera vez parecían completamente imposibles de comprobar pero, a través de varios procesos imprevistos, llegaron a situarse finalmente en el ámbito de la verificabilidad experimental. La idea de que la materia está hecha de átomos, la hipótesis de Pauli relativa a la existencia de partículas fantasmagóricas llamadas neutrinos, y la

posibilidad de que los cielos estén poblados de estrellas neutrón y agujeros negros son tres ideas importantes y precisamente de este tipo —ideas que hoy aceptamos plenamente, pero que, cuando fueron concebidas, parecían más ciencia ficción que aspectos del hecho científico—.

La motivación que llevó a que se introdujera la teoría de cuerdas es al menos tan irresistible como cualquiera de las tres ideas anteriores; de hecho, la teoría de cuerdas se ha acogido como el planteamiento más importante y emocionante de la física teórica desde el descubrimiento de la mecánica cuántica. Esta comparación es especialmente adecuada porque la historia de la mecánica cuántica nos enseña que dentro de la física las revoluciones pueden tardar muchas décadas en alcanzar la madurez. Además, en comparación con los especialistas en teoría de cuerdas actuales; los físicos que desarrollaron la mecánica cuántica tenían una gran ventaja: incluso cuando sólo estaba parcialmente formulada, la mecánica cuántica podía conectar directamente con los resultados experimentales. Aun así, fueron necesarios cerca de 30 años para que se desarrollara la estructura lógica de la mecánica cuántica, y alrededor de 20 años más para incorporar plenamente la relatividad especial dentro de esta teoría. Actualmente estamos incorporando la relatividad general, una tarea que es mucho más desafiante, y que, además, conecta con los experimentos con muchas más dificultades. A diferencia de los que desarrollaron la teoría cuántica, los especialistas actuales en teoría de cuerdas no tienen la brillante luz de la naturaleza —mediante resultados experimentales concretos— para que les guíe los pasos.

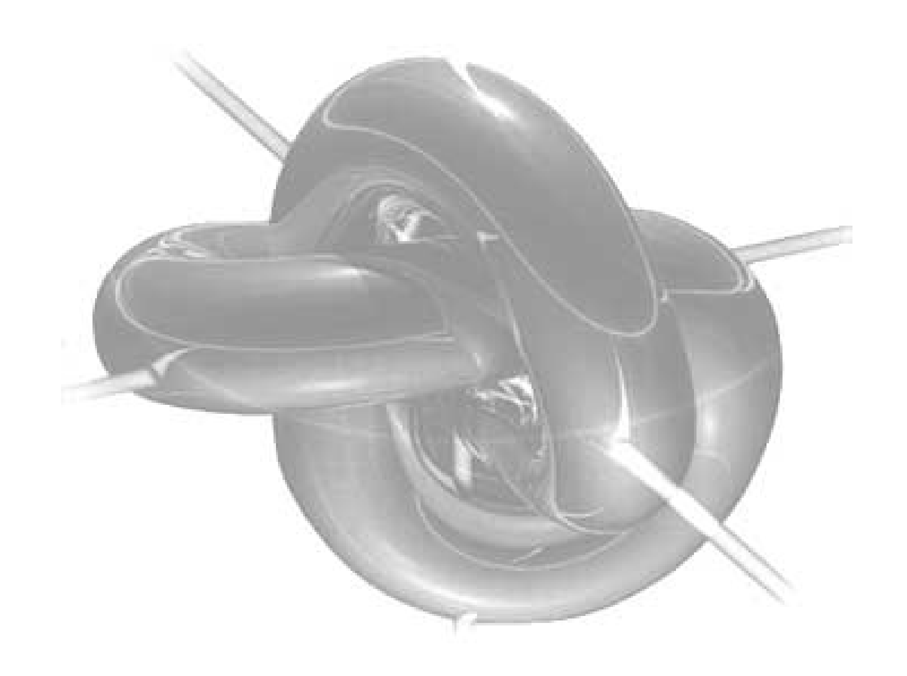
Esto significa que es concebible que una o más generaciones de físicos dediquen sus vidas a la investigación y al desarrollo de la teoría de cuerdas sin conseguir ni una pizca de información experimental. El importante número de físicos que se dedican en todo el mundo a seguir activamente la pista de la teoría de cuerdas, sabe que está asumiendo un riesgo: que toda una vida de esfuerzos podría llevar a resultados no concluyentes. Sin duda, continuará produciéndose un progreso teórico significativo, pero ¿será suficiente para superar los actuales obstáculos y producir predicciones definitivas experimentalmente comprobables? ¿Darán las pruebas indirectas que hemos comentado anteriormente el resultado de un auténtico rifle humeante para la teoría de cuerdas? Estas cuestiones tienen una importancia fundamental para todos los especialistas en teoría de cuerdas, pero también hay preguntas a las que nadie sabe responder. Sólo el paso del tiempo dirá cuáles son las respuestas. La bella sencillez de la teoría de cuerdas, el modo en que pone bajo control el conflicto entre la gravedad y la mecánica cuántica, su capacidad de unificar todos los ingredientes de la naturaleza y su potencial ilimitado para realizar predicciones, todo ello sirve para aportar una fecunda inspiración que hace que valga la pena asumir el riesgo.

Estas nobles consideraciones se han visto reforzadas continuamente por la capacidad de la teoría de cuerdas para descubrir nuevas y sorprendentes

características físicas de un universo basado en las cuerdas, características que ponen de manifiesto una coherencia sutil y profunda en el funcionamiento de la naturaleza. En el lenguaje que hemos presentado anteriormente, muchas de estas características son características genéricas que, independientemente de los detalles que por ahora son desconocidos, serán las propiedades básicas de un universo formado por cuerdas. Las más sorprendentes de estas características han causado un profundo efecto en nuestro modo —siempre en evolución— de comprender el espacio y el tiempo.

Parte IV

Teoría de cuerdas y la estructura del espaciotiempo



Capítulo 10

Geometría Cuántica

A lo largo de aproximadamente una década, Einstein echó abajo él solo todo el marco newtoniano, que había estado vigente durante siglos, y proporcionó al mundo un modo más profundo, radicalmente nuevo, y demostrable, de entender la gravedad. No tardó mucho para que los expertos y no expertos parlotearan sobre la diáfana brillantez y la monumental originalidad de este logro de Einstein consistente en dar forma a la relatividad general. Sin embargo, no debemos perder de vista las circunstancias históricas favorables que contribuyeron fuertemente al éxito de Einstein. Entre estas circunstancias destacan en primer lugar los descubrimientos matemáticos realizados en el siglo XIX por Georg Bernhard Riemann, que construyó sólidamente el aparato geométrico necesario para describir los espacios curvos de dimensiones arbitrarias. En su famosa conferencia inaugural de 1854 en la Universidad de Gottingen, Riemann rompió las cadenas del espacio plano euclídeo, ideó y pavimentó el camino hacia un tratamiento matemático igualitario de la geometría en todo tipo de superficies curvas. Son estas ideas de Riemann las que proporcionaron las matemáticas necesarias para analizar cuantitativamente espacios alabeados como los que se ilustran en las Figuras 3.4 y 3.6. La genialidad de Einstein consistió en reconocer que este cuerpo de las matemáticas estaba hecho a medida para desarrollar su nueva visión de la fuerza de la gravedad. Declaró audazmente que las matemáticas de la geometría de Riemann se ceñían perfectamente a la física de la gravedad.

Pero ahora, casi un siglo después de la hazaña de Einstein, la teoría de cuerdas nos ofrece una descripción de la gravedad en el marco de la mecánica cuántica, que, necesariamente, modifica la relatividad general cuando las distancias implicadas se vuelven tan cortas como la longitud de Planck. Puesto que la geometría riemanniana es el núcleo matemático de la relatividad general, esto significa que esta geometría también ha de ser modificada para reflejar fielmente la nueva física de distancias cortas de la teoría cuerdas. Mientras la relatividad general afirma que las propiedades curvas del universo se describen mediante la geometría riemanniana, la teoría de cuerdas sostiene que esto es verdad sólo si examinamos la estructura del universo a

escalas suficientemente grandes. A escalas tan pequeñas como la longitud de Planck, debe emerger una nueva geometría que se ciña a la nueva física de la teoría de cuerdas. Ese nuevo marco geométrico se llama *geometría cuántica*.

A diferencia del caso de la geometría riemanniana, no existe una teoría geométrica hecha a la medida esperando en la estantería de algún matemático para que los especialistas en teoría de cuerdas la adopten y la pongan al servicio de la geometría cuántica. Al contrario, los físicos y los matemáticos están ahora estudiando intensamente la teoría de cuerdas y, poco a poco, van montando una nueva rama de la física y las matemáticas. Aunque todavía está por escribir la historia completa, estas investigaciones han descubierto ya muchas propiedades geométricas nuevas del espacio-tiempo que trae consigo la teoría de cuerdas, propiedades que ciertamente habrían emocionado incluso a Einstein.

El corazón de la geometría de Riemann

Si una persona salta sobre una cama elástica, el peso del cuerpo alabea la lona estirando sus fibras elásticas. Este estiramiento alcanza el máximo justo debajo del cuerpo y se nota cada vez menos cuanto más cerca de los bordes. Se puede ver esto claramente si una imagen conocida como la Mona Lisa está pintada en la cama elástica. Cuando ésta no soporta peso alguno, el aspecto de la Mona Lisa es el habitual. Pero, cuando alguien se sitúa de pie sobre la cama elástica, la imagen de la Mona Lisa se distorsiona, sobre todo la parte que está justo debajo del cuerpo, como se ilustra en la Figura 10.1.

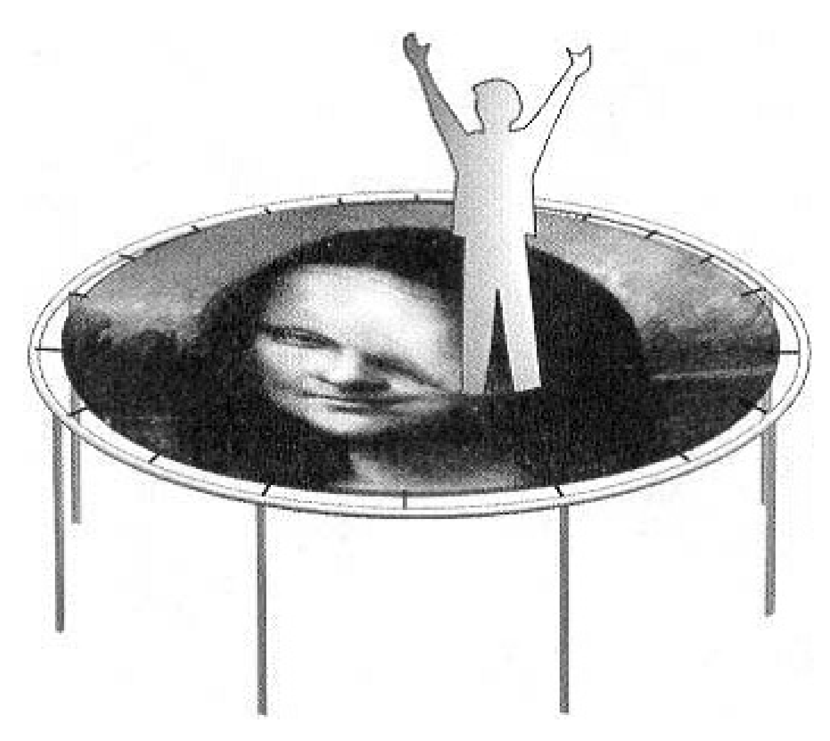


Figura 10.1 Si una persona se sitúa en pie sobre una cama elástica con la figura de la Mona Lisa, la imagen se distorsiona al máximo justo bajo los pies, debido al peso de dicha persona.

Este ejemplo penetra hasta el núcleo del marco matemático de Riemann para describir formas alabeadas. Riemann, construyendo su teoría sobre las ideas anteriores de los matemáticos Carl Friedrich Gauss, Nikolai Lobachevsky, Janos Bolyai y otros, demostró que un minucioso análisis de las *distancias* entre todas las posiciones situadas sobre un objeto o dentro de él proporciona el medio para cuantificar la intensidad de su curvatura. Dicho de una manera aproximada, cuanto mayor es el estiramiento (no uniforme) —es decir, cuanto mayor es la desviación con respecto a las relaciones de distancia en una forma plana— mayor es la curvatura del objeto. Por ejemplo, la cama elástica tiene su estiramiento más significativo justo debajo del cuerpo y, por consiguiente, las relaciones de distancia entre los puntos de esa zona están más seriamente distorsionadas. Por lo tanto, esta zona de la cama elástica tiene el máximo de curvatura, de acuerdo con lo que podía esperarse, ya que es donde la Mona Lisa sufre la mayor distorsión, mostrando la insinuación de una mueca en el extremo de su sonrisa enigmática habitual.

Einstein adoptó los descubrimientos matemáticos de Riemann dándoles una interpretación física precisa. Demostró, como ya explicamos en el capítulo 3, que la curvatura del espacio-tiempo personifica la fuerza de la gravedad. Pero pensemos ahora más detenidamente sobre esta interpretación. Matemáticamente, la curvatura del espacio-tiempo —como la curvatura de la cama elástica— refleja las relaciones de distancia distorsionadas que se dan entre sus *puntos*. Físicamente, la fuerza de la gravedad que experimenta un objeto es un reflejo directo de esta distorsión. De hecho, haciendo que el objeto sea cada vez más pequeño, la física y las matemáticas se alinean cada vez con mayor precisión a medida que nos acercamos más a la

constatación física del concepto matemático abstracto de punto. Pero la teoría de cuerdas limita el grado de precisión que puede constatarse en el formalismo geométrico de Riemann mediante la física de la gravedad, porque existe un límite para lo pequeño que se puede hacer cualquier objeto. Una vez que se desciende al nivel de las cuerdas, no se puede ya ir más lejos. El concepto tradicional de partícula puntual no existe en la teoría de cuerdas, lo cual es un elemento esencial de su capacidad para proporcionamos una teoría cuántica de la gravedad. Esto nos demuestra concretamente que el marco geométrico de Riemann, que se basa fundamentalmente en las distancias entre puntos, queda modificado a escalas ultramicroscópicas por la teoría de cuerdas.

Esta observación tiene un efecto muy pequeño en las aplicaciones macroscópicas ordinarias de la relatividad general. Cuando realizan estudios cosmológicos, por ejemplo, los físicos hacen rutinariamente modelos de galaxias completas como si éstas fueran puntos, ya que su tamaño, en relación con el del universo entero, es extremadamente pequeño. Por este motivo, la aplicación del marco geométrico de Riemann de esta manera tan tosca resulta ser finalmente una aproximación muy exacta, como lo prueba el éxito de la relatividad general en un contexto cosmológico. Sin embargo, en el ámbito ultramicroscópico, la naturaleza alargada de las cuerdas garantiza que la geometría de Riemann no será el formalismo matemático correcto que se necesita. Como veremos a continuación, este formalismo matemático se ha de sustituir por la geometría cuántica de la teoría de cuerdas, lo cual conducirá al descubrimiento de unas propiedades radicalmente nuevas e inesperadas.

Un pelotero Cosmológico

Según el modelo del *big bang* que aporta la cosmología, la totalidad del universo emergió violentamente de una única explosión cósmica, hace unos 15 mil millones de años. Hoy, como descubrió Hubble inicialmente, podemos ver que los «desechos» de esta explosión, en forma de muchos miles de millones de galaxias, siguen fluyendo hacia fuera. El universo se está expandiendo. No sabemos si este crecimiento cósmico continuará eternamente o si llegará un tiempo en que la expansión se frene hasta detenerse y entonces se invierta, llegando a una implosión cósmica. Los astrónomos y los astrofísicos intentan aclarar esta cuestión experimentalmente, ya que la respuesta depende de algo que en principio ha de ser medido: la densidad media de la materia del universo.

Si la densidad media de la materia supera la denominada *densidad crítica*, cuyo

valor es de aproximadamente una centésima de una milésima de una millonésima de una trillonésima (10^{-29}) de un gramo por centímetro cúbico —alrededor de cinco átomos de hidrógeno por cada metro cúbico del universo— entonces una fuerza gravitatoria suficientemente grande permitirá al cosmos detener e invertir la expansión. Si la densidad media de la materia es menor que el valor crítico, la atracción gravitatoria será demasiado débil para detener la expansión, que continuará por siempre. (Basándonos en nuestras propias observaciones del universo, podríamos pensar que la densidad media de la masa del universo excede ampliamente el valor crítico. Pero hay que tener presente que la materia, como el dinero, tiende a agruparse. Utilizar la densidad media de la masa de la Tierra, o del sistema solar, o incluso la de la Vía Láctea como indicador para la de todo el universo sería como utilizar el valor neto de la fortuna de Bill Gates como indicador de la situación financiera del terrícola medio. Del mismo modo que hay mucha gente cuya fortuna neta palidece en comparación con la de Bill Gates, con lo que la media disminuye enormemente, también hay entre las galaxias una enorme cantidad de espacio casi vacío que hace descender drásticamente la densidad media de la materia en su globalidad).

Estudiando detenidamente la distribución de las galaxias en el espacio, los astrónomos pueden obtener una estimación bastante buena de la cantidad media de materia visible que hay en el universo. Este valor resulta ser significativamente menor que el valor crítico. Sin embargo, existen pruebas contundentes, de origen tanto teórico como experimental, de que el universo está permeado de materia oscura. Se trata de materia que no participa en los procesos de fusión nuclear que son responsables de la actividad de las estrellas y, en consecuencia, no emite luz; por consiguiente es invisible para el telescopio de los astrónomos. Nadie ha descifrado la identidad de la materia oscura, y menos aún de forma exacta la cantidad de esta materia. Por lo tanto, el destino de este universo que actualmente se expande no está claro por ahora.

Sólo para intentar explicarlo, supongamos que la densidad de la masa sí que excede el valor crítico y que algún día, en un futuro lejano, la expansión cesará y el universo comenzará a colapsarse sobre sí mismo. Todas las galaxias comenzarán a aproximarse unas a otras lentamente y, con el paso del tiempo, su velocidad de acercamiento aumentará hasta que todas choquen a una velocidad increíble. Tenemos que imaginarnos la totalidad del universo apiñándose en una masa cósmica que se comprime cada vez más. Como decíamos en el capítulo 3, desde un tamaño de muchos miles de millones de años luz, el universo se comprimirá hasta alcanzar unos cuantos millones de años luz, aumentando la velocidad a cada momento, mientras *todo* se comprime hasta llegar al tamaño de una sola galaxia, y luego hasta el tamaño de una sola estrella, posteriormente un planeta y, si seguimos bajando, llegamos al

tamaño de una naranja, un guisante, un grano de arena, y más adelante, según la relatividad general, hasta el tamaño de una molécula, un átomo y, como final inexorable, el *big crunch* cósmico (lo opuesto al big bang) para llegar a *ningún tamaño en absoluto*. De acuerdo con la teoría convencional, el universo empezó con un bang, a partir de un estado inicial de tamaño cero y, si tiene masa suficiente, terminará con un crunch volviendo a un estado similar de compresión cósmica definitiva.

Pero cuando las escalas de distancias implicadas están alrededor de la longitud de Planck o menos, la mecánica cuántica invalida las fórmulas de la relatividad general, tal como sabemos ahora. Por lo tanto, en vez de esas fórmulas, debemos utilizar la teoría de cuerdas. Así pues, considerando que la relatividad general de Einstein permite que el molde geométrico del universo se haga arbitrariamente pequeño —exactamente del mismo modo que las matemáticas de la geometría de Riemann permiten que una forma abstracta adopte un tamaño tan pequeño como pueda imaginarse nuestro intelecto— nos vemos abocados a preguntar cómo hace la teoría de cuerdas para modificar todo esto. Como veremos a continuación, hay pruebas de que la teoría de cuerdas establece una vez más un límite inferior para las escalas de distancias físicamente accesibles y, de un modo asombrosamente innovador, proclama que el universo no puede ser comprimido hasta un tamaño inferior a la longitud de Planck en ninguna de sus dimensiones espaciales.

Dado que la teoría de cuerdas ahora ya nos resulta familiar, podríamos sentirnos tentados de aventurar un pronóstico sobre cómo sucede esto. Después de todo, podríamos argumentar que, independientemente de cuántos puntos apilemos unos encima de otros —es decir, partículas puntuales— el total de sus volúmenes combinados siempre es cero. Por el contrario, si estas partículas son realmente cuerdas, plegadas juntas con unas orientaciones completamente aleatorias, llenarían una burbuja de tamaño no nulo, aproximadamente como una bola del tamaño de Planck que contendría una maraña de cintas de goma. Con esta argumentación, estaríamos en el buen camino, pero nos faltarían algunas características significativas y sutiles que la teoría de cuerdas utiliza elegantemente con el fin de sugerir un tamaño mínimo para el universo. Estas características sirven para poner de relieve, de una manera concreta, la nueva física de las cuerdas que entra en juego, y también el impacto resultante que esta física produce en la geometría del espacio-tiempo.

Para explicar estos aspectos tan importantes, veamos primero un ejemplo que deja a un lado detalles extraños sin sacrificar la nueva física. En vez de tener en cuenta la totalidad de las diez dimensiones del espacio-tiempo en la teoría de cuerdas —o incluso las cuatro dimensiones extendidas del espacio-tiempo con las que estamos familiarizados— volvamos al universo de la manguera. Originalmente habíamos presentado este universo de dos dimensiones espaciales en el capítulo 8, dentro de un

contexto previo al de las cuerdas, para explicar ciertos aspectos de las ideas planteadas por Kaluza y Klein en la década de 1920. Ahora vamos a utilizar dicho universo como «pelotero cosmológico» para explorar las propiedades de la teoría de cuerdas dentro de un marco sencillo; utilizaremos brevemente las ideas que vamos a plantear, con el fin de entender mejor las dimensiones espaciales que requiere la teoría de cuerdas. Para ello, supondremos que la dimensión circular del universo de la manguera aparece inicialmente en toda su amplitud, pero luego se va reduciendo a tamaños cada vez más pequeños, acercándose al modelo de Linealandia —una versión parcial y simplificada del *big crunch*.

La pregunta que intentaremos responder es si las propiedades geométricas y físicas de este colapso cósmico tienen características que difieren notablemente cuando comparamos un universo basado en cuerdas con otro basado en partículas puntuales.

La nueva característica esencial

No tenemos que ir muy lejos para buscar la nueva física esencial de las cuerdas, una partícula puntual que se mueve en este universo bidimensional, puede realizar los tipos de movimiento que se ilustran en la Figura 10.2: puede moverse por la dimensión extendida de la manguera, puede recorrer su parte circular, o cualquier combinación de las dos. Un bucle de cuerda puede realizar un movimiento similar, con la diferencia de que oscila mientras se mueve sobre la superficie, como se muestra en la Figura 10.3(a). Ésta es una diferencia que ya hemos comentado con cierto detalle: las oscilaciones de la cuerda le proporcionan características tales como masa y cargas de fuerza. Aunque sea un aspecto crucial de la teoría de cuerdas, éste no es ahora nuestro tema central, puesto que ya hemos comprendido sus implicaciones físicas.

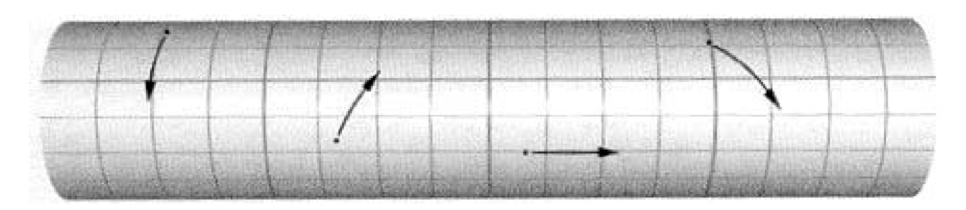


Figura 10.2 Partículas puntuales moviéndose sobre un cilindro.

En vez de eso, nuestro interés actual se centra en otra diferencia entre el movimiento de las partículas puntuales y el de las cuerdas, una diferencia que

depende directamente de la *forma* del espacio a través del cual se esté moviendo la cuerda. Dado que ésta es un objeto alargado, hay otra configuración posible, además de las ya mencionadas: puede *envolver* —haciendo un lazo, por decirlo así— la parte circular del universo manguera, como se muestra en la Figura 10.3 (b).[87] La cuerda continuará deslizándose y oscilando, pero lo hará en esta configuración ampliada. De hecho, la cuerda puede envolver la parte circular del espacio cualquier número de veces, como también se muestra en la Figura 10.3 (b), y de nuevo ejecutará un movimiento oscilante mientras se desliza. Cuando una cuerda está en esa configuración envolvente, decimos que se mueve en un *modo de bobinado*. Claramente, estar en un modo de bobinado es una posibilidad inherente a las cuerdas. No hay contrapartida en el caso de las partículas puntuales. Ahora intentaremos comprender las implicaciones que tiene en la propia cuerda este tipo de movimiento de cuerdas cualitativamente nuevo, así como las propiedades geométricas de la dimensión que envuelve.

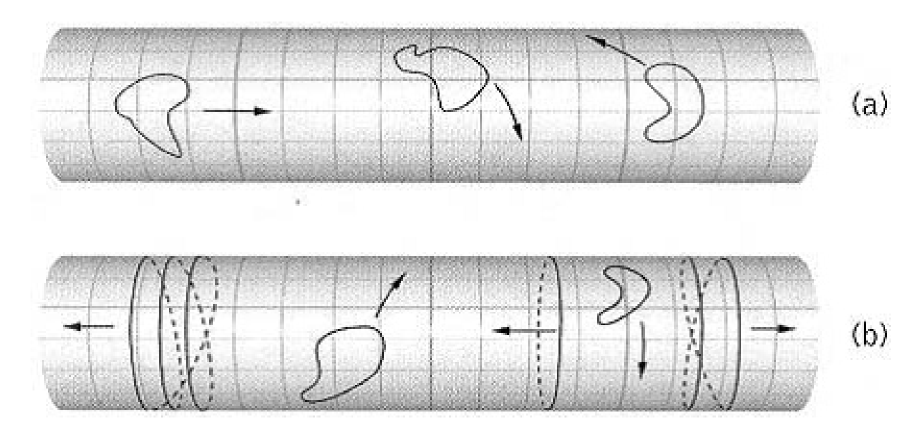


Figura 10.3 Las cuerdas pueden moverse sobre un cilindro de dos maneras diferentes: en configuraciones «no envolventes» o en configuraciones «envolventes».

La física de las cuerdas envolventes

A través de nuestra discusión anterior sobre el movimiento de las cuerdas, nos hemos centrado en las cuerdas no envolventes. Las cuerdas que envuelven un componente circular del espacio comparten casi todas ellas las mismas propiedades que las cuerdas que hemos estudiado. Sus oscilaciones, al igual que las oscilaciones de las no envolventes, contribuyen fuertemente a las propiedades observadas en ellas. La diferencia esencial es que una cuerda enrollada tiene una masa *mínima*, determinada por el *tamaño* de la dimensión circular y el número de veces que envuelve a ésta. El movimiento oscilatorio de las cuerdas determina una contribución superior a este

mínimo.

No es difícil comprender el origen de esta masa mínima. Una cuerda enrollada tiene una longitud mínima determinada por la circunferencia de la dimensión circular y el número de veces que la cuerda la circunda. La longitud mínima de una cuerda determina su masa mínima: cuanto más larga es, mayor es la masa, puesto que hay más cantidad de cuerda. Dado que la longitud de una circunferencia es proporcional a su radio, las masas mínimas en el modo de enrollamiento son proporcionales al radio del círculo que envuelve la cuerda. Utilizando la fórmula de Einstein $E = mc^2$, donde se relaciona la masa y la energía, podemos decir también que la energía asociada a una cuerda envolvente es proporcional al radio de la dimensión circular. (Las cuerdas no envolventes tienen también una longitud mínima diminuta, ya que, si no la tuvieran, estaríamos de nuevo en el ámbito de las partículas puntuales. El mismo razonamiento podría conducir a la conclusión de que incluso las cuerdas no envolventes tienen una masa mínima minúscula pero no nula. En cierto sentido esto es verdad, pero los efectos mecánico-cuánticos descritos en el capítulo 6 —recuérdese de nuevo *El precio justo*— pueden cancelar exactamente esta contribución a la masa. Recordemos que así es como las cuerdas no envolventes pueden producir, por ejemplo, el fotón, el gravitón, y las otras partículas de masa nula o casi nula. Las cuerdas envolventes son distintas en este aspecto).

¿Cómo afecta la existencia de configuraciones de cuerdas envolventes a las propiedades *geométricas* de la dimensión alrededor de la cual se enrollan las cuerdas? La respuesta, que los físicos japoneses Keiji Kikkawa y Masami Yamasaki fueron los primeros en descubrir en 1984, es extraña y llama la atención.

Pensemos en las últimas etapas cataclísmicas de nuestra variante del *big crunch* en el universo de la manguera. Cuando el radio de la dimensión circular se reduce a la longitud de Planck y, según el patrón de la relatividad general, continúa reduciéndose hasta longitudes aún menores, la teoría de cuerdas insiste en una reinterpretación radical de lo que sucede realmente. La teoría de cuerdas afirma que ¡*todos* aquellos procesos físicos que se producen en el universo de la manguera en los que el radio de la dimensión circular sea menor que la longitud de Planck y siga descendiendo, son absolutamente idénticos a los procesos físicos en los que la dimensión circular es mayor que la longitud de Planck y va en aumento! Esto significa que cuando la dimensión circular intenta reducirse radicalmente pasando por la longitud de Planck y va hacia tamaños aún menores, la teoría de cuerdas hace inútiles estos intentos, volviendo las tornas en el aspecto geométrico. La teoría de cuerdas demuestra que este proceso se puede expresar de otra forma —exactamente reinterpretar— diciendo que la dimensión circular se reduce hasta la longitud de Planck, para luego comenzar a expandirse. La teoría de cuerdas reescribe las leyes de la geometría de las distancias pequeñas, de tal modo que lo que previamente parecía ser un colapso cósmico total se

ve ahora como un *salto* cósmico. La dimensión circular puede reducirse hasta la longitud de Planck, pero, debido a los modos de enrollamiento, los intentos de seguir reduciéndose dan como resultado real una expansión. Veamos por qué.

El espectro de los estados de las cuerdas

Algunas de las ideas que se plantean en esta sección y en las inmediatamente siguientes son bastante sutiles, por lo que le recomendamos que no se desanime si tiene problemas para seguir los pasos de la explicación, especialmente si los problemas surgen en una sola lectura.

La nueva posibilidad de que existan configuraciones de cuerdas arrolladas implica que la energía de una cuerda que se encuentre en el universo de la manguera proviene de *dos* fuentes: el movimiento vibratorio y la energía de enrollamiento. Según el legado de Kaluza y Klein, cada una de ellas depende de la geometría de la manguera, es decir, del radio de su componente circular arrollada, pero con un giro claramente propio de una cuerda, ya que las partículas puntuales no pueden enrollarse alrededor de las dimensiones. Por consiguiente, nuestra primera tarea será determinar con exactitud el modo en que las contribuciones que el enrollamiento y la vibración realizan a la energía de una cuerda dependen del tamaño de su dimensión circular. Para esto, se ha visto que es conveniente dividir el movimiento vibratorio de las cuerdas en dos categorías: vibraciones *uniformes* y *ordinarias*. Las vibraciones ordinarias se refieren a las oscilaciones usuales que ya hemos comentado repetidamente, tales como las que se ilustran en la Figura 6.2; las vibraciones uniformes se refieren a un movimiento aún más sencillo: el movimiento global de la cuerda cuando se desliza de una posición a otra sin cambiar su forma. Todo movimiento de una cuerda es una combinación de deslizamiento y oscilación —de vibraciones uniformes y ordinarias— pero para esta explicación es más fácil separarlas de esta manera. De hecho, las vibraciones ordinarias no desempeñan un papel principal en nuestro razonamiento, por lo que no tendremos en cuenta sus efectos hasta haber terminado de plantear lo esencial de nuestra argumentación.

He aquí las dos observaciones esenciales. Primero, las excitaciones vibratorias uniformes de una cuerda tienen energías que son *inversamente* proporcionales al radio de su dimensión circular. Esto es una consecuencia directa del principio de incertidumbre de la mecánica cuántica: un radio menor deja a una cuerda más estrictamente confinada y por consiguiente, debido a la claustrofobia mecánico-cuántica, aumenta la cantidad de energía en su movimiento. Así, cuando el radio de la

dimensión circular disminuye, la energía cinética de la cuerda aumenta necesariamente, lo cual es la característica determinante de la proporcionalidad inversa. Segundo, como vimos en la sección anterior, las energías del modo de enrollamiento son *directamente* —no inversamente— proporcionales al radio. Recordemos que esto se debe a la longitud mínima de las cuerdas enrolladas y, por lo tanto, su energía mínima es proporcional al radio. Estas dos observaciones establecen que valores grandes del radio implican grandes energías de enrollamiento y pequeñas energías de vibración, mientras que valores pequeños del radio implican energías de enrollamiento pequeñas y energías de vibración grandes.

Esto nos lleva a un hecho clave: para cualquier radio circular grande del universo de la manguera, existe el correspondiente universo con radio circular pequeño para el cual las energías de enrollamiento de las cuerdas en el primer universo igualan a las energías de vibración de las cuerdas en el último, y las energías de vibración de las cuerdas en el primero igualan a las energías de enrollamiento de las cuerdas en el último. Dado que las propiedades físicas son sensibles a la energía *total* de una configuración de cuerdas —y no a como se divide la energía entre contribuciones de vibración y de enrollamiento— *no hay ninguna diferencia física* entre estas formas *geométricamente distintas* que puede adoptar el universo de la manguera. Y así, de una manera bastante extraña, la teoría de cuerdas afirma que no hay ninguna diferencia entre un universo creado en una manguera «gorda» y uno creado en una manguera «delgada».

Es un acertijo cósmico de apuestas, algo parecido a lo que haría usted, un inversor inteligente, si tuviera que enfrentarse al siguiente rompecabezas. Suponga que se entera de que los destinos de dos clases de acciones que se cotizan en Wall Street —por ejemplo, una empresa que fabrica aparatos de gimnasia y otra que fabrica válvulas de bypass para el corazón— están estrechamente ligados. Hoy cerraron ambos la cotización a 1 dólar por acción, y usted se entera a través de una fuente fiable de información de que, si las acciones de una de las empresas suben, las otras bajarán, y viceversa. Además su fuente de información —que es totalmente fiable (pero cuyo asesoramiento podría ir más allá de los límites de lo legal)— le dice que los precios de cierre del día siguiente estarán, con absoluta certeza, en una relación inversa el uno respecto al otro. Es decir, si una de las empresas cierra a 2 dólares por acción, la otra cerrará a medio dólar (50 centavos) por acción; si una de las empresas cierra a 10 dólares por acción, la otra cerrará a un décimo de dólar (10 centavos) por acción, y así siempre. Pero lo que no le puede decir su fuente de información es qué empresa cerrará la cotización al precio alto y cuál cerrará al precio bajo. ¿Qué hará usted?

Bueno, usted invierte todo su dinero en la bolsa, dividiéndolo a partes iguales entre las acciones de estas dos empresas. Como podrá comprobar fácilmente

calculando unos cuantos ejemplos, independientemente de lo que suceda al día siguiente, su inversión no perderá valor. En el peor de los casos puede quedarse igual (si ambas empresas vuelven a cerrar a 1 dólar), pero cualquier movimiento del precio de las acciones —coherentemente con su información privilegiada— aumentará su capital. Por ejemplo, si la empresa de aparatos de gimnasia cierra a 4 dólares y la empresa de las válvulas cierra a un cuarto de dólar (25 centavos), su valor en conjunto es 4,25 dólares (por cada par de acciones), lo cual mejora los 2 dólares del día anterior. Además, desde el punto de vista del valor neto, no importa lo más mínimo si la empresa de aparatos de gimnasia cierra al alza y la empresa de válvulas para el corazón cierra con pérdidas, o viceversa. Si usted se fija sólo en la cantidad total de dinero, estas dos circunstancias distintas son financieramente indistinguibles.

La situación en la teoría de cuerdas es análoga en cuanto a que la energía en las configuraciones de cuerdas proviene de dos fuentes —vibraciones y enrollamientos— cuyas contribuciones a la energía total de una cuerda son generalmente diferentes. Pero, como veremos con mayor detalle más adelante, ciertos pares de circunstancias geométricas distintas —que conducen a una situación de alta energía de enrollado/baja energía de vibración o baja energía de enrollado/alta energía de vibración— son *físicamente* indistinguibles. Además, a diferencia de lo que sucede en la analogía bursátil para la cual aquellas consideraciones que vayan más allá del capital total pueden distinguir entre los dos tipos de acciones, no existe absolutamente ninguna distinción entre las dos configuraciones de las cuerdas.

En realidad, veremos que, para hacer más estrecha la analogía con la teoría de cuerdas, tendríamos que considerar lo que sucedería si usted en su inversión inicial no dividiera el dinero a partes iguales entre las acciones de las dos empresas, sino que comprara, por ejemplo, 1.000 acciones de la empresa de aparatos de gimnasia y 3.000 acciones de la empresa de válvulas para el corazón. En este caso, el valor total de sus inversiones depende de cuál sea la empresa que cierra al alza y cuál la que cierra a la baja. Por ejemplo, si las acciones cierran a 10 dólares (las de aparatos de gimnasia) y a 10 centavos (las de válvulas), su inversión inicial de 4.000 dólares tendrá ahora un valor de 10.300 dólares. Si sucede a la inversa —que las acciones cierran a 10 centavos (las de aparatos de gimnasia) y a 10 dólares (las de válvulas)— su inversión valdrá 30.100 dólares, un capital significativamente mayor.

Sin embargo, la relación inversa entre las cotizaciones de las acciones al cierre sí que garantiza lo siguiente. Si un amigo suyo invierte exactamente «al contrario» de como lo hace usted —3.000 acciones de la empresa de aparatos de gimnasia y 1.000 acciones de la empresa de válvulas para el corazón— entonces el valor de la inversión de su amigo será de 10.300 dólares si las acciones cierran «altas las de las válvulas/bajas las de los aparatos de gimnasia» (lo mismo que la inversión de usted en el cierre «altas las de los aparatos de gimnasia/bajas las de las válvulas») y de

30.100 dólares si cierran «altas las de los aparatos de gimnasia/bajas las de las válvulas» (de nuevo igual que la inversión de usted en la situación recíproca). Es decir, desde el punto de vista del valor total de las acciones, el hecho de intercambiar las acciones que cierran al alza con las que cierran a la baja queda compensado exactamente intercambiando el número de acciones que posee usted de cada empresa.

Recordemos esta última observación mientras volvemos a la teoría de cuerdas y pensemos sobre las posibles energías de las cuerdas en un ejemplo específico. Supongamos que el radio de la dimensión circular de la manguera es, por ejemplo, diez veces la longitud de Planck. Lo escribiremos $R = 10$. Una cuerda puede enrollarse alrededor de esta dimensión circular una vez, dos veces, tres veces, y así sucesivamente. El número de veces que una cuerda se enrolla alrededor de la dimensión circular se llama su *número de enrollamiento*. La energía que procede del enrollamiento, que está determinada por la longitud de la cuerda enrollada, es proporcional al *producto* del radio por el número de enrollamiento. Adicionalmente, con cualquier número de enrollamiento, la cuerda puede estar sometida a un movimiento vibratorio. Dado que las vibraciones uniformes que estamos considerando ahora tienen energías que son inversamente dependientes del radio, estas energías son proporcionales a los múltiplos enteros del *inverso* del radio —$1/R$— que en este caso es un décimo de la longitud de Planck. A este múltiplo entero lo llamamos *número de vibración*.[88]

Como se puede ver, esta situación es muy similar a lo que vimos en Wall Street, porque los números de enrollamiento y de vibración son analogías directas de las acciones de las dos empresas, mientras que R y $1/R$ corresponden a las cotizaciones de cierre por acción de cada empresa. Entonces, del mismo modo que usted puede calcular fácilmente el valor total de su inversión a partir del número de acciones que posee en cada empresa y las cotizaciones al cierre de la sesión, también podemos calcular la energía total que transporta una cuerda en términos de su número de vibración, su número de enrollamiento y el radio. En la Tabla 10.1 ofrecemos una lista parcial de estas energías totales para varias configuraciones de cuerdas, que especificamos indicando sus números de enrollamiento y de vibración en un universo manguera de radio $R = 10$.

Número de vibración	Número de enrollamiento	Energía Total
1	1	1/10 + 10 = 10.1
1	2	1/10 + 20 = 20.1
1	3	1/10 + 30 = 30.1
1	4	1/10 + 40 = 40.1
2	1	2/10 + 10 = 10.2
2	2	2/10 + 20 = 20.2
2	3	2/10 + 30 = 30.2
2	4	2/10 + 40 = 40.2
3	1	3/10 + 10 = 10.3

3	2	3/10 + 20 = 20.3
3	3	3/10 + 30 = 30.3
3	4	3/10 + 40 = 40.3
4	1	4/10 + 10 = 10.4
4	2	4/10 + 20 = 20.4
4	3	4/10 + 30 = 30.4
4	4	4/10 + 40 = 40.4

Tabla 10.1 Ejemplo de configuraciones de vibración y bobinado de una cuerda que se mueve en el universo mostrado en la Figura 10.3, con radio $R = 10$. Las energías de vibración contribuyen en múltiplos de 1/10 y las energías de bobinado contribuyen en múltiplos de 10, produciendo las energías totales listadas. La unidad de energía es la energía de Planck, así por ejemplo, 10.1 en la última columna significa 10.1 veces la energía de Planck.

Una tabla completa sería infinitamente larga, ya que los números de enrollamiento y vibración pueden tomar valores enteros arbitrarios, pero este fragmento representativo de la tabla es adecuado para nuestra explicación. A partir de la tabla y de nuestras observaciones vemos que estamos en una situación de «alta energía de enrollamiento/baja energía de vibración»: las energías de enrollamiento vienen dadas en múltiplos de 10, mientras que las energías de vibración se presentan en múltiplos de un número menor, que es 1/10.

Supongamos ahora que el radio de la dimensión circular se reduce, por ejemplo, de 10 a 9,2 y luego a 7,1 y así sucesivamente a 3,4, 2,2, 1,1, 0,7, hasta llegar a 0,1 (1/10), donde, por lo que respecta a esta discusión, se detiene. En esta forma geométricamente distinta del universo de la manguera, podemos recopilar las energías de las cuerdas en una tabla análoga: las energías de enrollamiento son ahora múltiplos de 1/10, mientras que las energías de vibración son múltiplos de su inverso, es decir, de 10. Estos resultados se muestran en la Tabla 10.2.

A primera vista, las dos tablas podrían parecer diferentes, pero, si se examinan más detenidamente, se observa que, aunque estén dispuestas en un orden diferente, las columnas de la «energía total» de ambas tablas tienen entradas *idénticas*. Para encontrar la entrada que en la Tabla 10.2 corresponde a una entrada determinada de la Tabla 10.1, basta con intercambiar los números de vibración y de enrollamiento. Es decir, los datos de vibración y de enrollamiento desempeñan papeles complementarios cuando el radio de la dimensión circular cambia de 10 a 1/10. Y así, por lo que respecta a las energías totales de las cuerdas, *no hay distinción* entre estos tamaños diferentes de la dimensión circular. Al igual que el intercambio de «altas las acciones de los aparatos de gimnasia/bajas las de las válvulas» por «altas las de las válvulas/bajas las de los aparatos de gimnasia» se compensa de manera exacta intercambiando el número de acciones de cada empresa que se posee, el intercambio de radio 10 por radio 1/10 se compensa exactamente intercambiando los números de vibración y enrollamiento. Además, aunque para hacer las cosas más sencillas hemos elegido un radio inicial $R = 10$ y su inverso 1/10, se llegaría a las mismas

conclusiones eligiendo cualquier valor del radio y su inverso correspondiente.[89]

Número de vibración	Número de enrollamiento	Energía Total
1	1	10 + 1/10 = 10.1
1	2	10 + 2/10 = 10.2
1	3	10 + 3/10 = 10.3
1	4	10 + 4/10 = 10.4
2	1	20 + 1/10 = 20.1
2	2	20 + 2/10 = 20.2
2	3	20 + 3/10 = 20.3
2	4	20 + 4/10 = 20.4
3	1	30 + 1/10 = 30.1
3	2	30 + 2/10 = 30.2
3	3	30 + 3/10 = 30.3
3	4	30 + 4/10 = 30.4
4	1	40 + 1/10 = 40.1
4	2	40 + 2/10 = 40.2
4	3	40 + 3/10 = 40.3
4	4	40 + 4/10 = 40.4

Tabla 10.2 Como en la Tabla 10.1, excepto que el radio es ahora tomado como 1/10.

Las tablas 10.1 y 10.2 están incompletas por dos razones. En primer lugar, como ya se ha dicho, sólo hemos incluido en la lista unas pocas de las infinitas posibilidades de los números de enrollamiento y vibración que puede asumir una cuerda. Esto, desde luego, no plantea ningún problema —podríamos hacer las tablas tan largas como nos lo permitiera la paciencia y hallaríamos que la relación entre ellas sigue cumpliéndose—. En segundo lugar, además de la energía de enrollamiento, hasta ahora sólo hemos tenido en cuenta las contribuciones energéticas que se derivan del movimiento de vibración uniforme de una cuerda. Ahora deberíamos incluir también las vibraciones ordinarias, ya que éstas aportan contribuciones adicionales a la energía total de las cuerdas y determinan asimismo las cargas de fuerza que transportan. Lo importante, sin embargo, es que las investigaciones han puesto de manifiesto que estas contribuciones no dependen del tamaño del radio. Por lo tanto, aunque incluyéramos estas características más detalladas de los atributos de las cuerdas en las Tablas 10.1 y 10.2, dichas tablas seguirían manteniendo la misma correspondencia, ya que las contribuciones vibratorias ordinarias afectan a cada tabla de idéntica manera. Por consiguiente, llegamos a la conclusión de que las masas y las cargas de las partículas en un universo de manguera de radio *R* son en todo idénticas a las de un universo manguera de radio 1/R. Y, puesto que estas masas y cargas de fuerza gobiernan la física fundamental, no hay modo de distinguir físicamente estos dos universos geométricamente distintos. Cualquier experimento realizado en uno de estos universos tiene un experimento correspondiente que se puede llevar a cabo en el otro

exactamente con los mismos resultados.

Una controversia

George y Gracie, después de volverse planos convirtiéndose en dos seres bidimensionales, se van a residir como profesores de física en el universo de la manguera. Después de instalar sus propios laboratorios en competencia mutua, cada uno de ellos afirma haber determinado el tamaño de la dimensión circular. Sorprendentemente, aunque ambos tienen la reputación de llevar a cabo sus investigaciones con gran precisión, sus conclusiones no concuerdan. George afirma que el radio circular es $R = 10$ veces la longitud de Planck, mientras que Gracie dice que el radio circular es $R = 1/10$ veces la longitud de Planck.

«Gracie», dice George, «basándome en mis cálculos, realizados según la teoría de cuerdas, sé que la dimensión circular tiene un radio cuya medida es 10, por lo que espero ver cuerdas cuyas energías figuran en la Tabla 10.1. He realizado otros experimentos utilizando el nuevo acelerador de energías de Planck y ha resultado que mi predicción queda confirmada con toda exactitud. Por consiguiente, estoy seguro de que la dimensión circular tiene un radio $R = 10$». Gracie, para defender su afirmación, expresa exactamente las mismas observaciones, salvo la conclusión de que la lista de energías de la Tabla 10.2 queda comprobada, confirmando que el radio es $R = 1/10$.

En un relámpago de inspiración, Gracie muestra a George que las dos tablas, aunque estén dispuestas de forma diferente, son en realidad idénticas. Ahora George que, como ya se sabe, razona un poco más despacio que Gracie, replica: «¿Cómo puede ser esto? Yo sé que valores diferente del radio dan lugar, por las propiedades básicas de la mecánica cuántica y las propiedades de las cuerdas enrolladas, a diferentes valores posibles para las energías y las cargas de las cuerdas. Si estamos de acuerdo en esto último, entonces también debemos estar de acuerdo en el valor del radio».

Gracie, utilizando sus recién descubiertas ideas sobre física de cuerdas, responde: «Lo que dices es casi, pero no del todo, correcto. Es *usualmente* cierto que dos valores diferentes del radio dan lugar a diferentes energías posibles. Sin embargo, en el caso especial de que dos valores del radio estén relacionados inversamente el uno con el otro —como 10 y 1/10— entonces las energías y cargas posibles son en realidad idénticas. Lo único que sucede es que lo que tú llamarías modo de enrollamiento, yo lo llamaría modo de vibración, y lo que tú llamarías modo de

vibración, yo lo llamaría modo de enrollamiento. Pero a la naturaleza no le importa el lenguaje que utilicemos. Por el contrario, la física está gobernada por las propiedades de los *ingredientes fundamentales* —las masas (energías) de las partículas y las cargas de fuerza que dichas partículas transportan—. Pero, tanto si el radio es *R* como si es 1/R, la totalidad de la lista de propiedades de los constituyentes es idéntica en el marco de la teoría de cuerdas».

En un momento de audaz comprensión, George responde: «Creo que lo he comprendido. Aunque los detalles de la descripción de las cuerdas que tú y yo podamos hacer sean posiblemente diferentes —el hecho de si las cuerdas están enrolladas en torno a la dimensión circular, o las particularidades de su comportamiento vibratorio— la totalidad de la lista de características físicas que pueden alcanzar es la misma. Por lo tanto, dado que las propiedades físicas del universo dependen de estas propiedades de los constituyentes básicos, no hay distinción ni modo de diferenciar entre los casos de radios que están en una relación inversa el uno con respecto al otro». Exactamente.

Tres preguntas

Al llegar a este punto, alguien podría decir: «Mira, si yo fuera uno de esos seres que viven en el universo de la manguera, lo que haría sería sencillamente medir la circunferencia de la manguera con una cinta métrica y así determinar el radio sin ambigüedades, sin condiciones ni pegas. Entonces, ¿qué es este absurdo de hablar de dos posibilidades indiferenciables cuando los radios son diferentes? Además, ¿no es cierto que la teoría de cuerdas deja a un lado las distancias inferiores a la longitud de Planck? Entonces, ¿por qué estamos hablando sobre dimensiones circulares cuyos radios son una fracción de la longitud de Planck? Y, finalmente, cuando estamos con esto, ¿a quién le importa el universo bidimensional de la manguera, es decir, qué añade todo esto cuando incluimos *todas* las dimensiones?».

Empecemos por responder a la última pregunta, que nos obligará a enfrentamos después con las dos primeras.

Aunque nuestra explicación se ha desarrollado en el universo de la manguera, sólo por simplificar las cosas nos hemos limitado a considerar una dimensión espacial extendida y otra arrollada. Si tenemos tres dimensiones espaciales extendidas y seis dimensiones circulares —siendo estas últimas las más sencillas de todos los espacios de Calabi-Yau— la conclusión es exactamente la misma. Cada uno de los círculos tiene un radio que, si se intercambia con su valor inverso, produce un universo

físicamente idéntico.

Incluso podemos dar un paso gigantesco hacia delante a partir de esta conclusión. En nuestro universo observamos tres dimensiones espaciales, cada una de las cuales, de acuerdo con ciertas observaciones astronómicas, se extiende a lo largo de aproximadamente 15 mil millones de años luz (un año luz es alrededor de 9,461 billones de kilómetros, por lo que esta distancia viene a ser unos 141.915 trillones de kilómetros). Como se indicó en el capítulo 8, no hay datos que nos puedan decir qué sucede más allá. No sabemos si estas distancias continúan indefinidamente o si, quizá, se curvan sobre sí mismas y retroceden describiendo un enorme círculo, ya que desbordan la capacidad visual de los telescopios más modernos. Si se diera la última posibilidad, un astronauta que viajara por el espacio siguiendo siempre una dirección fija, rodearía finalmente en un círculo todo el universo —como Magallanes cuando dio la vuelta a la Tierra— y volvería al punto de partida inicial.

Por consiguiente, las dimensiones extendidas que nos resultan familiares podrían tener forma de círculos y estar, por lo tanto, sometidas a la identificación física con los radios R y $1/R$ que se consideran en la teoría de cuerdas. Si expresamos esto mediante cifras aproximadas, si estas dimensiones familiares fueran circulares, entonces sus radios deberían tener una longitud aproximadamente igual a los 15 mil millones de años luz que hemos mencionado anteriormente, que es alrededor de diez millones de trillones de trillones de trillones ($R = 10^{61}$) de veces la longitud de Planck, y que seguiría creciendo con la expansión del universo. Si la teoría de cuerdas es correcta, esto es idéntico físicamente a una situación en la que dichas dimensiones familiares fueran circulares con unos radios increíblemente diminutos de aproximadamente $1/R = 1/10^{61} = 10^{-61}$ veces la longitud de Planck. *Así serían esas dimensiones familiares, que tan bien conocemos, en una descripción alternativa realizada según la teoría de cuerdas*. De hecho, en este lenguaje inverso, estos círculos diminutos se hacen cada vez más pequeños a medida que pasa el tiempo, ya que cuando R crece, 1/R disminuye. Ahora sí parece que realmente hemos perdido los estribos. ¿Cómo puede ser cierto esto? ¿Cómo puede «encajar» un ser humano que mide 1,80 metros de altura dentro de un universo tan increíblemente microscópico? ¿Cómo puede un universo que es como una mota insignificante ser físicamente idéntico a esa enorme extensión que vemos en los cielos? Además, ahora nos vemos obligados forzosamente a ir a la segunda de nuestras tres preguntas iniciales: se suponía que la teoría de cuerdas iba a eliminar la posibilidad de sondear distancias inferiores a la longitud de Planck. Pero, si una dimensión circular tiene un radio R cuya longitud es mayor que la longitud de Planck, su inverso 1/R es necesariamente una fracción de la longitud de Planck. Entonces, ¿qué está pasando? La respuesta, que se referirá también a la primera de nuestras tres preguntas, explica un aspecto importante y sutil del espacio y la distancia.

Dos nociones de distancia interrelacionadas en la teoría de cuerdas

La distancia es un concepto tan básico en nuestro conocimiento del mundo que es fácil subestimar lo profundo de su sutileza. Los sorprendentes efectos que la relatividad especial y la relatividad general han tenido sobre nuestros conceptos del espacio y del tiempo, y las nuevas características que surgen a partir de la teoría de cuerdas, nos inducen a ser un poco más cuidadosos con nuestra definición de distancia. En física, las definiciones más cargadas de significado son aquellas que resultan operativas, es decir, definiciones que proporcionan un medio, al menos en principio, para medir lo que se está definiendo. Después de todo, independientemente de lo abstracto que sea un concepto, tener una definición operativa nos permite extractar de su significado un procedimiento experimental para medir su valor.

¿Cómo podemos dar una definición operativa del concepto de distancia? La respuesta a esta pregunta en el contexto de la teoría de cuerdas es bastante sorprendente. En 1988, el físico Robert Brandenberger de la Brown University y el físico Cumrun Vafa de la Universidad de Harvard señalaron que, si la forma espacial de una dimensión es circular, existen dos definiciones diferentes de la distancia, aunque relacionadas entre sí, dentro de la teoría de cuerdas. Cada una de ellas establece un procedimiento experimental distinto para medir la distancia y se basa, por decirlo de una forma simplificada, en el sencillo principio de que si una sonda viaja a una velocidad fija y conocida, podemos medir una distancia dada determinando el tiempo que tarda la sonda en atravesar dicha distancia. La diferencia entre los dos procedimientos está en la elección de la sonda utilizada. La primera definición utiliza las cuerdas que *no están* arrolladas alrededor de una dimensión circular, mientras que la segunda definición utiliza cuerdas que sí están arrolladas. Vemos que el carácter alargado de la sonda fundamental es responsable de que existan dos definiciones operativas naturales de distancia en la teoría de cuerdas. En una teoría de partículas puntuales, en la que no existe el concepto de enrollamiento, sólo habría una de estas definiciones.

¿En qué difieren los resultados de cada procedimiento? La respuesta que encontraron Brandenberger y Vafa es tan sorprendente como sutil. La idea aproximada que subyace al resultado se puede entender recurriendo al principio de incertidumbre. Las cuerdas que no están enrolladas se pueden desplazar libremente y sondear completamente la circunferencia que rodea al círculo, que tiene una longitud proporcional a R. Por el principio de incertidumbre, sus energías son proporcionales a 1/R (recuérdese que en el capítulo 6 se mencionaba la relación inversa entre la energía de una sonda y las distancias a las que es sensible). Por otro lado, hemos visto que las cuerdas enrolladas tienen una energía mínima proporcional a R; sobre las

sondas de distancias, el principio de incertidumbre nos dice que son en consecuencia sensibles al inverso de su valor, 1/*R*. La expresión matemática de esta idea demuestra que, si cada sonda se utiliza para medir el radio de una dimensión circular del espacio, los sondeos de las cuerdas no enrolladas darán como resultado una medida R, mientras que para las cuerdas enrolladas será 1/R, donde, igual que antes, estamos midiendo las distancias en múltiplos de la longitud de Planck. El resultado de cada experimento tiene el mismo derecho a ser el radio del círculo —lo que sabemos por la teoría de cuerdas es que la utilización de sondas diferentes para medir distancias puede producir resultados diferentes—. De hecho, esta propiedad es válida para todas las mediciones de longitudes y distancias, no sólo para determinar el tamaño de una dimensión circular. Los resultados obtenidos por sondas de cuerdas enrolladas y no enrolladas están en relación inversa unos con respecto a otros.[90]

Si la teoría de cuerdas explica nuestro universo, ¿por qué no hemos hallado esos dos conceptos posibles de distancia en alguna de nuestras experiencias de la vida cotidiana o en algún experimento científico? Siempre que hablamos de distancia lo hacemos de una manera que reproduce nuestra experiencia de que sólo existe un concepto de distancia, sin que haya rastro de la existencia de un segundo concepto. ¿Por qué no hemos percibido la posibilidad alternativa? La respuesta es que, aunque existe un alto grado de simetría en nuestra explicación, cuando *R* (y, por lo tanto, también 1/*R*) difiere significativamente del valor 1 (aludiendo, de nuevo, a una vez la longitud de Planck), entonces una de nuestras definiciones operativas resulta extremadamente difícil de llevar adelante, mientras que la otra resulta ser extremadamente fácil de formular. En esencia, siempre hemos aplicado el método fácil, siendo completamente inconscientes de que existe otra posibilidad.

La diferencia en la dificultad de los dos métodos se debe a la gran diferencia entre las masas de las sondas utilizadas —alta energía de enrollamiento/baja energía de vibración, y viceversa— si el radio *R* (y, por lo tanto, también 1/*R*) difiere significativamente de la longitud de Planck (es decir, $R = 1$). Aquí la «alta» energía, para radios que son ampliamente diferentes de la longitud de Planck, corresponde a sondas de masa increíblemente grande —miles y miles de millones de veces más pesadas que el protón, por ejemplo— mientras que «bajas» energías corresponde a sondas cuya masa es como máximo una pizca por encima del cero. En tales circunstancias, la diferencia de dificultad entre los dos métodos es monumental, ya que incluso la producción de configuraciones de cuerdas pesadas es una empresa que, en el momento presente, está más allá de nuestra capacidad tecnológica. Así pues, en la práctica, sólo uno de los dos métodos es factible tecnológicamente —el que se refiere al más liviano de los dos tipos de configuraciones de cuerdas—. Éste es el que utilizamos implícitamente en todas aquellas discusiones en las que intervienen las distancias y que hemos realizado hasta ahora. Es el método que configura nuestra

intuición y por lo tanto encaja bien en ella.

Dejando a un lado las cuestiones que se refieren al aspecto práctico, en un universo gobernado por la teoría de cuerdas hay libertad para medir distancias utilizando cualquiera de los dos métodos. Cuando los astrónomos miden el «tamaño del universo» lo hacen examinando fotones que han viajado a través del cosmos y han entrado en sus telescopios. En este caso, los fotones son los modos *livianos* de las cuerdas. El resultado obtenido es la distancia de 10^{61} veces la longitud de Planck que hemos mencionado anteriormente. Si las tres dimensiones espaciales que nos resultan familiares son de hecho circulares y la teoría de cuerdas es correcta, los astrónomos que utilicen unos aparatos muy diferentes (y actualmente inexistentes) tendrían que poder, en principio, medir la amplitud de los cielos mediante modos de cuerdas enrolladas de gran peso y hallar un resultado que es el inverso de esta distancia gigantesca. En ese sentido es como podemos pensar que el universo es gigantesco, como creemos habitualmente, o increíblemente diminuto. Según los modos livianos de cuerdas, el universo es grande y se está expandiendo; según los modos pesados, es diminuto y se está contrayendo. En esto no hay ninguna contradicción; al contrario, tenemos dos definiciones de distancia diferentes pero igualmente lógicas. Nos resulta mucho más familiar la primera definición, debido a las limitaciones tecnológicas, pero, sin embargo, cada una de las definiciones representa un concepto igualmente válido.

Ahora podemos contestar a nuestra pregunta anterior relativa a los seres humanos de gran tamaño en un universo pequeño. Cuando medimos la altura de una persona y resulta que mide, por ejemplo, 1,80 metros, necesariamente usamos los modos de cuerdas livianos. Para comparar su tamaño con el del universo, debemos utilizar el mismo procedimiento de medición y, como hemos visto anteriormente, el resultado dice que el tamaño del universo es de 15 mil millones de años luz, algo mucho más grande que 1,80 metros. Preguntar cómo puede una persona así encajar en el universo «diminuto», según la medición con modos de cuerdas pesados, es plantear una pregunta sin sentido, es como comparar manzanas y naranjas. Dado que ahora tenemos dos conceptos de distancia —según utilicemos sondas de cuerdas ligeras o pesadas— debemos comparar mediciones realizadas de la misma manera.

Un tamaño mínimo

El camino ha sido un poco largo, pero ahora estamos dispuestos a abordar el punto clave. Si nos quedamos en medir distancias «de la forma fácil» —es decir, utilizando

el más liviano de los modos de cuerdas, en vez de usar los pesados— los resultados que se obtengan serán *siempre* mayores que la longitud de Planck. Para ver esto, examinemos a fondo el hipotético big crunch en relación con las tres dimensiones extensas, suponiendo que son circulares. Para facilitar el razonamiento, digamos que, al principio de nuestro experimento mental, los modos de cuerdas no enrolladas son los livianos y utilizándolos se determina que el universo tiene un radio enormemente grande que se reduce con el paso del tiempo. A medida que se reduce, estos modos no enrollados se vuelven más pesados y los modos enrollados se hacen más livianos. Cuando el radio se reduce continuamente hasta alcanzar la longitud de Planck —es decir, cuando *R* toma el valor 1— los modos de enrollamiento y de vibración tienen una masa parecida. Los dos métodos para medir la distancia se vuelven igualmente difíciles de aplicar y, además, los dos darían el mismo resultado, ya que el número 1 es su propio inverso.

A medida que el radio continúa reduciéndose, los modos de enrollamiento se vuelven más livianos que los modos no enrollados y por consiguiente, dado que nuestra opción es siempre la del «método más fácil», ahora se deberían usar *esos* modos para medir distancias. Según este método de medición, que da como resultado el *inverso* de lo que miden los modos no enrollados, *el radio es mayor que una vez la longitud de Planck y sigue aumentando*. Esto indica sencillamente que a medida que *R* —la cantidad medida por las cuerdas no enrolladas— disminuye hasta el valor 1 y sigue haciéndose cada vez más pequeño, 1/R —la cantidad medida mediante las cuerdas enrolladas— crece hasta 1 y continúa haciéndose más grande. Por lo tanto, si se pone cuidado en utilizar siempre los modos de cuerdas livianos —el método «fácil» para medir la distancia— el valor mínimo que se obtiene es la longitud de Planck.

En particular, se evita un big crunch hasta el tamaño cero, ya que el radio del universo tal como se mide utilizando sondas del modo de cuerdas liviano siempre es mayor que la longitud de Planck. En vez de seguir avanzando a través de la longitud de Planck hacia tamaños aún menores, el radio, cuando se mide mediante los modos de cuerdas livianos, disminuye hasta la longitud de Planck y luego comienza inmediatamente a aumentar. El crunch queda reemplazado por un rebote.

El uso de los modos de cuerdas livianos para medir distancias se corresponde con nuestro concepto convencional de distancia, el que ya se utilizaba mucho antes del descubrimiento de la teoría de cuerdas. Como se vio en el capítulo 5, *este* concepto de distancia era el que hacía que encontráramos problemas insalvables con violentas ondulaciones cuánticas si las distancias a escala inferior a la longitud de Planck desempeñaban algún papel en los aspectos físicos. Vemos una vez más, desde esta perspectiva complementaria, que la teoría de cuerdas evita las distancias ultracortas. En el marco físico de la relatividad general y en el correspondiente marco matemático

de la geometría riemanniana existe un único concepto de distancia, y éste puede adquirir valores arbitrariamente pequeños. En el marco físico de la teoría de cuerdas, y, en correspondencia, en el ámbito de la disciplina que está empezando a surgir y se llama geometría cuántica, existen dos conceptos de distancia. Haciendo un uso juicioso de ambas cosas, hallamos un concepto de distancia que encaja bien con nuestra intuición y, al mismo tiempo, con la relatividad general, cuando las escalas de las distancia son grandes, pero que difiere radicalmente de lo que prevén la intuición y la relatividad general cuando las distancias se hacen pequeñas. Concretamente, las distancias a escalas inferiores a la longitud de Planck son inaccesibles.

Dado que esta discusión es bastante sutil, volvamos a poner el énfasis en un aspecto central. Si quisiéramos despreciar la diferencia entre métodos «fáciles» y métodos «difíciles» para medir longitudes y, por ejemplo, continuar utilizando los modos no enrollados cuando *R* se reduce más allá de la distancia de Planck, podría parecer que llegaríamos a ser capaces de encontrar una distancia inferior a la longitud de Planck. Pero los párrafos anteriores nos informan de que esta palabra «distancia» se debe interpretar con cuidado, ya que pueden tener dos significados diferentes, de los cuales sólo uno se corresponde con nuestro concepto tradicional. Y en este caso, cuando *R* se reduce hasta longitudes inferiores a la de Planck, pero continuamos utilizando las cuerdas no enrolladas (incluso aunque ahora se hayan vuelto más pesadas que las cuerdas enrolladas), estamos empleando el método «difícil» para medir distancias y, por lo tanto, el significado de «distancia» *no* se corresponde con nuestro concepto estándar. No obstante, esta discusión es mucho más que una discusión semántica o incluso de conveniencia o de aspectos prácticos de la medición. Incluso si optamos por utilizar el concepto no estándar de distancia y, mediante él, describimos el radio como más corto que la longitud de Planck, las *propiedades físicas* con las que nos encontramos —como se explicó en anteriores secciones— serían idénticas a las de un universo en el que el radio, en el sentido convencional de distancia, es mayor que la longitud de Planck (como se atestigua, por ejemplo, mediante la correspondencia exacta entre las Tablas 10.1 y 10.2. Y es la física, no el lenguaje, lo que realmente importa.

Brandenberger, Vafa y otros físicos han utilizado estas ideas para sugerir que se reescriban las leyes de la cosmología de tal modo que el big bang y el posible big crunch no impliquen un universo de tamaño cero, sino uno que tenga la longitud de Planck en todas sus dimensiones. Es ciertamente una proposición muy atractiva para evitar los enigmas matemáticos, físicos y lógicos de un universo que surge de un punto infinitamente denso, o se colapsa en un punto así. Aunque es difícil conceptualmente imaginarse la totalidad del universo comprimida en una diminuta nuez del tamaño de Planck, pensar en todo el universo reducido a un punto sin tamaño alguno excede verdaderamente los límites de la imaginación. La cosmología

de cuerdas, como veremos en el capítulo 14, es una disciplina que se encuentra más bien en pañales, pero que supone una gran promesa y es muy posible que en lo relativo al modelo estándar del big bang nos aporte una alternativa más fácil de digerir.

¿Cuán general es esta conclusión?

¿Y qué sucedería si las dimensiones espaciales no tuvieran forma circular? En ese caso, ¿seguirían siendo válidas estas formidables conclusiones relativas a la extensión espacial mínima en la teoría de cuerdas? Nadie lo sabe con seguridad. El aspecto esencial de las dimensiones circulares es que permiten considerar la posibilidad de cuerdas enrolladas. En la medida en que las dimensiones espaciales —dejando a un lado los detalles relativos a su forma— permiten que las cuerdas se enrollen en torno a ellas, la mayoría de las conclusiones que hemos obtenido deberían seguir siendo aplicables. Pero ¿qué pasaría si, por ejemplo, dos de las dimensiones estuvieran en la forma de una esfera? En este caso, las cuerdas no podrían quedarse «atrapadas» en una configuración enrollada, porque siempre podrían deslizarse «escapándose», como una banda de goma estirada puede saltar y desprenderse de una pelota. De todas maneras, ¿limita la teoría de cuerdas el tamaño hasta el cual pueden reducirse estas dimensiones?

Numerosas investigaciones parecen indicar que la respuesta depende de si se está reduciendo toda una dimensión espacial (como en los ejemplos de este capítulo) o (como veremos y explicaremos en los capítulos 11 y 13) de si se está colapsando un «trozo» aislado del espacio. La opinión general entre los expertos en teoría de cuerdas es que, independientemente de la forma, existe como límite un tamaño mínimo, como en el caso de las dimensiones circulares, cuando estamos reduciendo una dimensión espacial completa. Demostrar esta expectativa constituye un objetivo importante para las investigaciones posteriores, porque tiene un impacto directo en varios aspectos de la teoría de cuerdas, incluidas sus repercusiones en la cosmología.

Simetría especular

Mediante la relatividad general, Einstein estableció un vínculo entre la física de la

gravedad y la geometría del espacio-tiempo. A primera vista, la teoría de cuerdas refuerza y amplía el vínculo entre la física y la geometría, ya que las propiedades de las cuerdas vibratorias —su masa y las cargas de fuerza que transportan— están determinadas en gran parte por las propiedades de la componente arrollada del espacio. Sin embargo, acabamos de ver que la geometría cuántica —la asociación de física y geometría en la teoría de cuerdas— tiene algunos giros sorprendentes. En la relatividad general, y en la geometría «convencional», un círculo de radio *R* es diferente de uno cuyo radio sea 1/R, pura y simplemente; no obstante, en la teoría de cuerdas son físicamente indistinguibles. Esto nos hace ser lo suficientemente audaces como para ir más adelante y preguntarnos si podrían existir formas geométricas del espacio que difirieran de un modo más drástico —no sólo en el tamaño global, sino posiblemente también en la forma— pero que fueran sin embargo físicamente indistinguibles en el marco de la teoría de cuerdas.

En 1988, Lance Dixon del *Stanford Linear Accelerator Center* (Centro de Aceleradores Lineales de Stanford) realizó una observación crucial al respecto, que posteriormente fue ampliada por Wolfgang Lerche del CERN, Vafa de Harvard y Nicholas Warner, entonces en el *Massachusetts Institute of Technology*. Apoyándose en argumentos estéticos basados en consideraciones relativas a la simetría, estos físicos formularon una audaz sugerencia en la que se planteaba la posibilidad de que dos formas diferentes de Calabi-Yau, elegidas para las dimensiones arrolladas adicionales dentro de la teoría de cuerdas, dieran lugar a propiedades físicas idénticas.

Para hacemos una idea de cómo esta posibilidad, bastante rebuscada, podría darse realmente, recordemos que el número de agujeros existentes en las dimensiones adicionales de Calabi-Yau determina el número de familias en las que aparecerán clasificadas las excitaciones de las cuerdas. Estos agujeros son análogos a los agujeros que podemos encontrar en un toro o en sus primos multiasa, como se ilustraba en la Figura 9.1. Una deficiencia de la representación bidimensional que podemos reproducir en el papel impreso es que no se puede mostrar que un espacio de Calabi-Yau de seis dimensiones puede tener agujeros de distintas dimensiones. Aunque tales agujeros son más difíciles de dibujar, es posible describirlos mediante unas matemáticas que se comprenden claramente. Un hecho clave es que el número de familias de partículas que surgen de las vibraciones de las cuerdas depende sólo del número total de agujeros, no del número de agujeros de cada dimensión en particular (ésta es la razón por la cual, por ejemplo, no nos preocupábamos de dibujar diferencias entre los distintos tipos de agujeros en la explicación que dimos en el capítulo 9). Imaginemos, pues, dos espacios de Calabi-Yau en los que el número de agujeros es diferente en las distintas dimensiones, pero en los que el número total de agujeros es el mismo. Dado que el número de agujeros en cada dimensión no es el

mismo, los dos espacios de Calabi-Yau tienen formas diferentes. Pero, puesto que tienen el mismo número total de agujeros, cada uno da lugar a un universo en el que hay *el mismo número de familias* que en el otro. Esto, desde luego, no es más que una propiedad física. La coincidencia en *todas* las propiedades físicas es un requisito mucho más restrictivo, pero esto, al menos, da una idea de cómo la conjetura de Dixon-Lerche-Vafa-Warner podría ser cierta.

A finales de 1987, entré en el departamento de física de Harvard como becario posdoctoral y mi despacho estaba justo debajo del pasillo donde se encontraba el de Vafa. Dado que mi tesis doctoral se había centrado en las propiedades físicas y matemáticas de las dimensiones arrolladas de Calabi-Yau en la teoría de cuerdas, Vafa me mantenía puntualmente informado de los avances de su trabajo en esta área. Cuando, a finales de 1988, aterrizó en mi despacho y me habló sobre la conjetura a la que habían llegado Lerche, Warner y él mismo, me quedé intrigado, pero también escéptico. La intriga surgía de la constatación de que, si su conjetura era cierta, podría abrir un nuevo y amplio camino en la investigación sobre teoría de cuerdas; el escepticismo se derivaba de la constatación de que las conjeturas son una cosa, y las propiedades demostradas de una teoría son otra bastante distinta.

Durante los meses siguientes, reflexioné con frecuencia sobre esta conjetura y, francamente, llegué a estar medio convencido de que no era cierta. Sin embargo, para mi sorpresa, un proyecto de investigación que aparentemente no guardaba ninguna relación y que había emprendido en colaboración con Ronen Plesser, que entonces era un estudiante graduado de Harvard y ahora trabaja en la facultad del *Weizmann Institute* y en la Universidad de Duke, iba a hacerme cambiar de opinión radicalmente. Plesser y yo nos habíamos interesado por desarrollar métodos para, comenzando con una forma de Calabi-Yau y manipulándola matemáticamente, producir formas de Calabi-Yau que hasta entonces eran desconocidas. Estábamos especialmente atraídos por una técnica conocida como *orbifolding* (plegado orbicular), de la que habían sido pioneros Dixon, Jeffrey Harvey de la Universidad de Chicago, Vafa y Witten a mediados de la década de 1980. Dicho en pocas palabras, se trata de un procedimiento en el que diferentes puntos de una forma inicial de Calabi-Yau se unen entre sí según unas reglas matemáticas que garantizan la producción de una nueva forma de Calabi-Yau. Esto se ilustra esquemáticamente en la Figura 10.4.

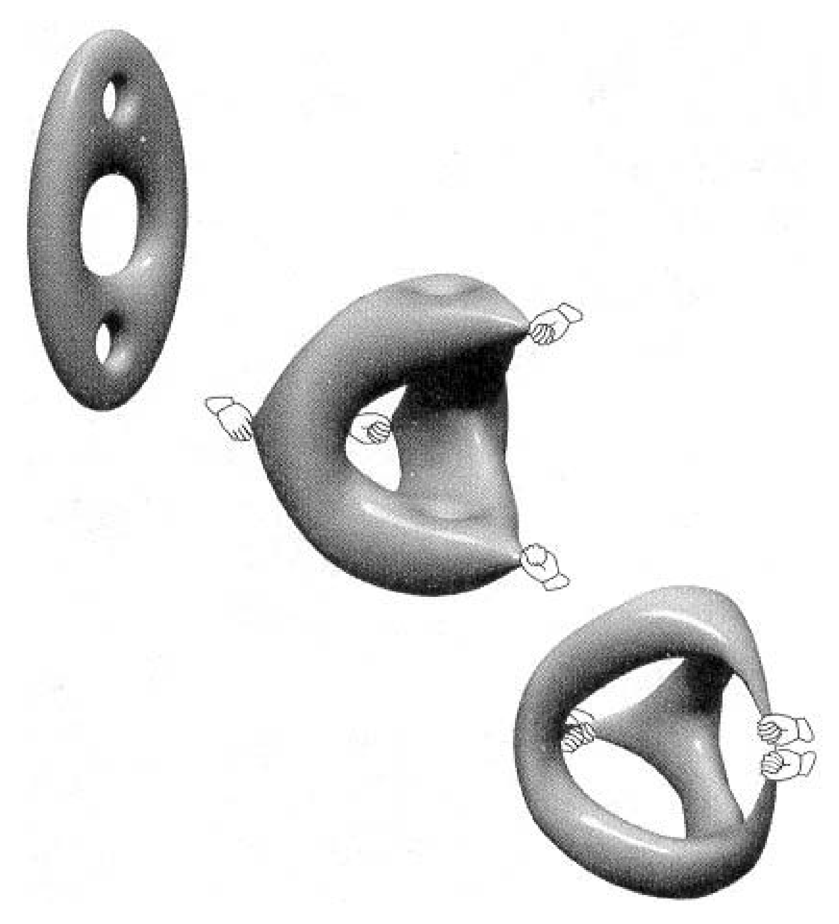


Figura 10.4 El *orbifolding*, o plegado orbicular, es un procedimiento mediante el cual se produce una nueva forma de Calabi-Yau, uniendo entre sí distintos puntos de una forma inicial de Calabi-Yau.

La complejidad de las matemáticas en las que se basan estas manipulaciones de la Figura 10.4 es formidable, y por esta razón los expertos en teoría de cuerdas han investigado minuciosamente el procedimiento sólo en su aplicación a la más sencilla de las formas: las versiones en dimensiones superiores de las formas de rosquilla que se muestran en la Figura 9.1. Plesser y yo constatamos, sin embargo, que algunas de las bellas ideas novedosas de Doran Gepner, que entonces estaba en la Universidad de Princeton, podían proporcionar un marco teórico poderoso a la técnica del *orbifolding*, o plegado orbicular, para formas de Calabi-Yau plenamente desarrolladas, como la que se ve en la Figura 8.9.

Tras unos pocos meses de perseguir intensivamente esta idea, llegamos a una constatación sorprendente. Si uníamos unos grupos especiales de puntos exactamente de la manera correcta, la forma de Calabi-Yau que producíamos difería de aquella con la que habíamos comenzado de una manera sorprendente: el número de agujeros de dimensión *impar* de la nueva forma de Calabi-Yau era igual al número de agujeros de dimensión *par* de la forma original, y viceversa. En particular, esto significa que el número total de agujeros —y por consiguiente el número de familias de partículas— es *el mismo* en ambas formas, a pesar incluso de que el intercambio par-impar signifique que sus formas y sus estructuras geométricas fundamentales sean bastante

diferentes.[91]

Emocionados por el contacto aparente que habíamos establecido con la conjetura de Dixon-Lerche-Vafa-Warner, Plesser y yo planteamos de manera apremiante la pregunta esencial: aparte del número de familias de partículas, ¿estos dos espacios de Calabi-Yau diferentes coinciden en el resto de sus propiedades físicas? Después de un par de meses más de análisis matemático arduo y minucioso, durante el cual recibimos la valiosa inspiración y el inapreciable aliento de Grahan Ross, el asesor de mi tesis en Oxford, y también de Vafa, Plesser y yo conseguimos argumentar que la respuesta era un sí absolutamente definitivo. Por razones matemáticas que tenían relación con el intercambio par-impar, Plesser y yo acuñamos el término *copias especulares* para designar los espacios de Calabi-Yau equivalentes físicamente, aunque geométricamente distintos.[92] Los espacios individuales que constituyen un par-espejo de espacios de Calabi-Yau no son entre sí literalmente como imágenes especulares, en el sentido habitual. Sin embargo, a pesar de que tienen propiedades geométricas diferentes, dan lugar a un único universo físico cuando se utilizan para las dimensiones adicionales en la teoría de cuerdas.

Las semanas siguientes al hallazgo de este resultado fueron una época de extrema ansiedad. Plesser y yo sabíamos que nos hallábamos inmersos en una parcela nueva e importante de la física de cuerdas. Habíamos demostrado que la estrecha asociación entre geometría y física, establecida originalmente por Einstein, quedaba sustancialmente modificada por la teoría de cuerdas: unas formas geométricas drásticamente diferentes, y que implicarían unas propiedades físicas diferentes dentro de la relatividad general, estaban dando lugar a propiedades físicas idénticas dentro de la teoría de cuerdas. Pero ¿qué sucedería si nos habíamos equivocado? ¿Qué pasaría si sus implicaciones físicas diferían de algún modo sutil que hubiéramos pasado por alto? Cuando mostramos nuestros resultados a Yau, por ejemplo, éste afirmó educadamente pero con firmeza que probablemente habíamos cometido un error; Yau sostenía que, desde un punto de vista matemático, nuestros resultados eran demasiado extravagantes para ser ciertos. Su valoración nos hizo detener nuestro trabajo durante bastante tiempo. Una cosa es cometer un error en una cuestión modesta o de poco bulto que no llama mucho la atención, pero nuestro descubrimiento, sin embargo, sugería la posibilidad de dar un paso inesperado en una nueva dirección que ciertamente provocaría una fuerte reacción. Si nos equivocábamos, se iba a enterar todo el mundo.

Finalmente, después de mucho comprobar y revisar, nuestra confianza creció y enviamos nuestro trabajo para que fuera publicado. Unos pocos días más tarde, estaba sentado en mi despacho de Harvard y el teléfono sonó. Era Philip Candelas de la Universidad de Texas, que me preguntó inmediatamente si estaba sentado. Lo estaba.

Entonces me dijo que él y dos de sus discípulos, Monika Lynker y Rolf

Schimmrigk, habían descubierto algo que iba a hacer que me cayera de la silla. Examinando minuciosamente un amplio conjunto de muestras de espacios de Calabi-Yau que ellos habían generado por ordenador, descubrieron que casi todos se presentaban en parejas que diferían precisamente por el intercambio de números pares e impares de agujeros. Le dije que aún estaba sobre mi silla —y que Plesser y yo habíamos descubierto el mismo resultado—. El trabajo de Candelas y el nuestro resultaron ser complementarios; habíamos dado un paso hacia delante en la demostración de que toda la física resultante en un par de espacios-espejo era idéntica, mientras que Candelas y sus discípulos habían demostrado que una muestra significativamente grande de formas de Calabi-Yau aparecían en forma de pares de espacios especulares. Mediante ambos trabajos habíamos descubierto la *simetría especular* de la teoría de cuerdas.[93]

La física y las matemáticas de la simetría especular

La flexibilización de la asociación única y rígida establecida por Einstein entre la geometría del espacio y las propiedades físicas observadas es una de las innovaciones paradigmáticas más impactantes de la teoría de cuerdas. Sin embargo, estos avances llevan implícito mucho más que un cambio de postura filosófica. La simetría especular, en particular, aporta un instrumento poderoso para comprender, tanto la física de la teoría de cuerdas, como las matemáticas de los espacios de Calabi-Yau.

Los matemáticos que trabajaban en un campo llamado geometría algebraica habían estado estudiando los espacios de Calabi-Yau por razones puramente matemáticas mucho antes de que se descubriera la teoría de cuerdas. Habían desarrollado muchas de las propiedades detalladas de estos espacios geométricos, sin sospechar que existiría una futura aplicación física. Sin embargo, ciertos aspectos de los espacios de Calabi-Yau demostraron ser difíciles —prácticamente imposibles— de descifrar completamente, pese a los esfuerzos de los matemáticos. Pero el descubrimiento de la simetría especular en la teoría de cuerdas cambió esta situación significativamente. En esencia, la simetría especular proclama que ciertas parejas especiales de espacios de Calabi-Yau, parejas de las que previamente se pensó que no estaban relacionadas en absoluto, están ahora íntimamente conectadas mediante la teoría de cuerdas. Los espacios de estas parejas están vinculados entre sí por el universo físico común que determina cada uno de ellos, si cualquiera de los dos es el que se selecciona para las dimensiones adicionales arrolladas. Esta interrelación, previamente insospechada, proporciona una nueva e incisiva herramienta física y

matemática.

Supongamos, por ejemplo, que estamos calculando arduamente las propiedades físicas —masas y cargas de fuerza de las partículas— asociadas con una posible opción de Calabi-Yau para las dimensiones adicionales. No nos preocupa especialmente confrontar cada uno de los resultados con los de algún experimento, ya que, como hemos visto anteriormente, hay ciertos obstáculos teóricos y tecnológicos que hacen esto bastante difícil en la actualidad. En vez de eso, estamos analizando un experimento teórico relativo al aspecto que tendría el universo si un espacio concreto de Calabi-Yau *fuera* seleccionado. Durante cierto tiempo, todo va bien, pero luego, a la mitad de nuestro trabajo, nos encontramos con un cálculo matemático cuya dificultad es un obstáculo insalvable. Nadie, ni siquiera el matemático más experto del mundo, puede explicar el modo de realizarlo. Nos quedamos atascados. Pero, entonces nos damos cuenta de que este espacio de Calabi-Yau tiene una pareja-espejo. Dado que la física de cuerdas resultante asociada con cada miembro de una pareja— espejo es la misma, constatamos que somos libres de realizar nuestros cálculos utilizando cualquiera de los dos espacios de la pareja. Y así, reelaboramos ese cálculo que era tan difícil en el espacio de Calabi-Yau original, en términos de un cálculo que se realiza en su espejo, teniendo garantizado que el resultado del cálculo —la física— será igual. A primera vista se podría pensar que la versión reelaborada del cálculo será tan difícil como la versión original. Pero, aquí nos encontramos con una agradable y enorme sorpresa: descubrimos que, aunque el resultado es el mismo, la forma detallada del cálculo es muy diferente y, en algunos casos, el cálculo horriblemente difícil con el que habíamos empezado se convierte en un cálculo extremadamente fácil en el espacio-espejo de Calabi-Yau. No hay una explicación sencilla que aclare por qué sucede esto, pero —al menos en el caso de ciertos cálculos— está totalmente claro que sucede, y la disminución en el nivel de dificultad puede ser drástica. La consecuencia, desde luego, está clara: ya no nos quedamos atascados.

Es algo así como si alguien nos pide que contemos exactamente el número de naranjas que se han echado a la buena de Dios hasta llenar un enorme contenedor de unos 15 metros por cada lado y alrededor de 3 metros de profundidad. Si empezamos a contarlas de una en una, pronto nos damos cuenta de que la tarea es demasiado laboriosa. Pero, afortunadamente llega un amigo que estaba presente cuando llegaron allí las naranjas. Nos cuenta que venían embaladas en unas cajas de menor tamaño (por casualidad, él trae una en la mano) y que, cuando estaban apiladas, había 20 cajas a lo largo, 20 a lo ancho y 20 a lo alto. Calculamos rápidamente que las naranjas llegaron en 8.000 cajas y todo lo que tenemos que hacer es calcular cuántas naranjas estaban embaladas en cada caja. Esto lo podemos averiguar fácilmente pidiéndole la caja prestada a nuestro amigo y llenándola de naranjas, y así podremos realizar la

ingente tarea de recuento casi sin esfuerzo. En esencia, reorganizando el cálculo inteligentemente, hemos sido capaces de hacer que fuera mucho más fácil de llevar a cabo.

La situación es similar en el caso de muchos cálculos que se han de realizar en el marco de la teoría de cuerdas. Desde la perspectiva de un espacio de Calabi-Yau, un cálculo podría contener un enorme número de pasos matemáticos difíciles. Sin embargo, trasladando el cálculo a su espejo, es posible reorganizarlo de una manera mucho más eficiente, permitiendo así su realización con una relativa facilidad. Esta idea la planteamos Plesser y yo, y Candelas la puso en práctica formidablemente en un trabajo posterior realizado con sus colaboradores, Xenia de la Ossa y Linda Parkes, de la Universidad de Texas, y Paul Green, de la Universidad de Maryland. Demostraron que ciertos cálculos de una dificultad casi inimaginable se podían realizar utilizando el procedimiento especular, con unas pocas páginas de álgebra y un ordenador personal.

Fue un avance especialmente interesante para los matemáticos, porque algunos de estos cálculos eran precisamente aquellos en los que se habían quedado atascados durante muchos años. La teoría de cuerdas —al menos así lo proclamaban los físicos — les había ganado adelantando la solución.

Ahora bien, tenemos que recordar que entre los matemáticos y los físicos existe un sano espíritu competitivo, generalmente bien intencionado. En este sentido, resulta que dos matemáticos noruegos —Geir Ellingsrud y Stein Arilde Stremme— estaban trabajando en uno de los numerosos cálculos que Candelas y sus colaboradores resolvieron con éxito mediante la simetría especular. Dicho en pocas palabras, se trataba de calcular el número de esferas que se podían «embalar» dentro de un espacio determinado de Calabi-Yau, algo parecido a nuestra analogía del recuento de las naranjas que caben en un enorme contenedor. En una reunión de físicos y matemáticos celebrada en Berkeley en 1991, Candelas anunció el resultado obtenido por su grupo utilizando la teoría de cuerdas y la simetría especular: 317.206.375. Ellingsrud y Stremme anunciaron el resultado de su extraordinariamente difícil cálculo matemático: 2.682.549.425. Durante varios días, los matemáticos y los físicos sostuvieron un debate: ¿quién tenía razón? El asunto se convirtió en una auténtica prueba definitiva sobre la fiabilidad cuantitativa de la teoría de cuerdas. Varias personas llegaron incluso a comentar —un poco en broma— que esta prueba era la cosa más sublime, inmediatamente detrás de la posibilidad de ser capaces de confrontar la teoría de cuerdas con pruebas experimentales. Además, los resultados obtenidos por Candelas estaban muy lejos del único resultado numérico que Ellingsrud y Stremme afirmaban haber obtenido en sus cálculos. Candelas y sus colaboradores declararon haber hallado también la respuesta a muchas otras cuestiones que eran de una dificultad muchísimo mayor —de hecho, tan difíciles que

ningún matemático había ni siquiera intentado resolverlas—. Pero ¿se podía confiar en los resultados de la teoría de cuerdas? La reunión terminó con gran cantidad de intercambios fructíferos entre matemáticos y físicos, pero sin que se resolviera la discrepancia.

Aproximadamente un mes más tarde, circulaba un mensaje por correo electrónico entre los participantes en la reunión de Berkeley con una noticia titulada *¡La física triunfa!* Ellingsrud y Stremme habían hallado un error en el código de su ordenador que, tras ser corregido, confirmaba el resultado de Candelas. Desde entonces, se han realizado muchas comprobaciones matemáticas de la fiabilidad cuantitativa que ofrece la simetría especular dentro de la teoría de cuerdas: ha pasado con éxito todas las pruebas. También más recientemente, casi una década después de que los físicos descubrieran la simetría especular, los matemáticos han realizado un gran avance revelando sus fundamentos matemáticos inherentes. Utilizando importantes aportaciones de los matemáticos Maxim Kontsevich, Yuri Manin, Gang Tian, Jun Li y Alexander Givental, Yau y sus colaboradores Bong Lian y Kefeng Liu han hallado finalmente una prueba matemática rigurosa de las fórmulas utilizadas para el recuento de esferas dentro de los espacios de Calabi-Yau, resolviendo así varios problemas que habían traído de cabeza a los matemáticos durante cientos de años.

Más allá de las particularidades de este éxito, lo que estos avances destacan es el papel que los físicos han comenzado a desempeñar en las matemáticas modernas. Durante bastante tiempo, los físicos han «excavado» en los archivos matemáticos a la búsqueda de instrumentos para construir y analizar modelos del mundo físico. Ahora, gracias al descubrimiento de la teoría de cuerdas, la física está empezando a saldar la deuda, suministrando a los matemáticos nuevos planteamientos poderosos para sus problemas no resueltos. La teoría de cuerdas, no sólo aporta un marco unificador para la física, sino que puede seguramente llegar a establecer una unión igualmente profunda también con las matemáticas.

Descosiendo la estructura del espacio

Si estira usted incesantemente una membrana de goma, antes o después se romperá. Este simple hecho ha inducido a numerosos físicos durante años a preguntarse si sucedería lo mismo con la estructura espacial que forma el universo. Es decir, ¿puede la estructura del espacio rasgarse, o es esto sencillamente un concepto equivocado que surge de tomar demasiado en serio la analogía de la membrana de goma?

La relatividad general de Einstein dice que no, que la estructura del universo no se puede rasgar.[94] Las fórmulas de la relatividad general están firmemente asentadas en la geometría riemanniana y, como dijimos en el capítulo anterior, esta geometría es un marco que analiza distorsiones en las relaciones de distancia entre ubicaciones próximas en el espacio. Con el fin de hablar con sentido sobre estas relaciones de distancia, el formalismo matemático en que se basan requiere que el sustrato del espacio sea *liso*, un término que tiene un significado técnico matemático, pero cuyo uso cotidiano capta su esencia: nada de arrugas, ni perforaciones, ni piezas separadas «amontonadas» juntas, y nada de rajaduras. Si la estructura del espacio desarrollara tales irregularidades, las fórmulas de la relatividad general se derrumbarían, indicando algún tipo de catástrofe cósmica, un suceso desastroso que nuestro universo, con su aparente buen comportamiento, evita.

Esto no ha impedido que algunos teóricos imaginativos hayan ponderado a lo largo de los años la posibilidad de que una nueva formulación de la física que fuera más allá de la teoría clásica de Einstein e incorporara la física cuántica fuera capaz de demostrar que pueden darse rasgados, hendiduras o soldaduras en la estructura espacial. De hecho, la constatación de que la física cuántica da lugar a ondulaciones violentas en distancias cortas indujo a algunos a especular con la idea de que los rasgados y hendiduras podrían ser una característica microscópica corriente de la estructura del espacio. El concepto de *wormholes* o agujeros de gusano (un concepto con el que cualquier aficionado a *Star Trek: Deep Space Nine* está familiarizado) utiliza estas reflexiones. La idea es sencilla: imagine que usted es el director general de una empresa importante con su sede principal en el piso noveno de una de las

torres del *City's World Trade Center* de Nueva York (ahora derribadas). Por azares de la historia de su empresa, una sección con la que usted necesita tener cada vez mayor contacto está instalada en el noveno piso de la otra torre. Como no resulta práctico trasladar ninguna oficina, se le ocurre a usted una sugerencia muy natural: construir un puente de una oficina a la otra, conectando así las dos torres. Esto permite que los empleados se desplacen libremente entre las oficinas, sin tener que bajar y luego subir nueve pisos cada vez.

Un *wormhole* desempeña un papel similar: es un puente o túnel que proporciona un atajo desde una región del universo a otra. Utilizando un modelo bidimensional, imagine que un universo tiene la forma que se representa en la Figura 11.1.

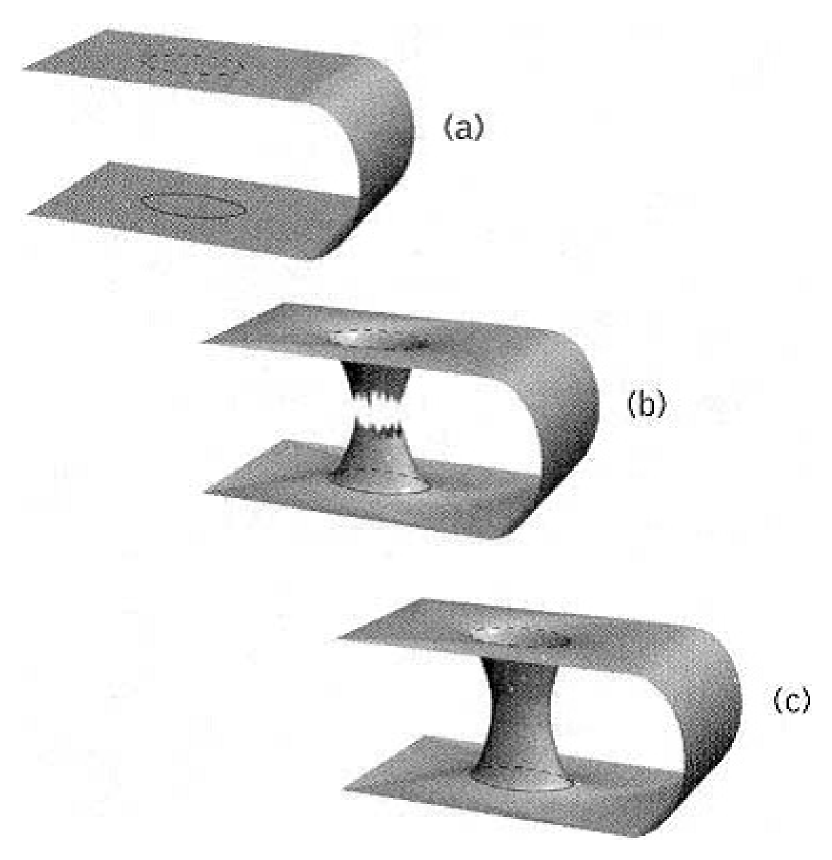


Figura 11.1 (a) En un universo con «forma de U», el único modo de ir de un extremo al otro es atravesando todo el cosmos. (b) La estructura del espacio se raja, y los dos extremos del *wormhole* empiezan a crecer. (c) Los dos extremos del *wormhole* se conectan, formando un nuevo puente —un atajo— desde un extremo del universo hasta el otro.

Si la sede principal de su empresa está situada cerca del ciclo inferior en 11.1(a), la única forma en que usted puede llegar a su oficina de operaciones, situada cerca del ciclo superior es recorriendo todo el camino en forma de U, que le lleva de un extremo del universo al otro, pero, si la estructura del espacio puede rasgarse, desarrollando estructuras como las que se ven en 11.1 (b), y si de estas perforaciones pueden «crecer» tentáculos que luego se fusionan como en 11.1 (c), tendremos un puente espacial que conecta regiones que previamente estaban alejadas. Esto es un *wormhole*. Observamos que el *wormhole* tiene cierta similitud con el puente del

World Trade Center, pero hay una diferencia esencial: el puente del *World Trade Center* atravesaría una región de un espacio *existente*, el espacio que existe entre las dos torres. Por el contrario, el *wormhole* crea una *nueva* región en el espacio, ya que el espacio curvo bidimensional de la Figura 11.1 (a) es *todo* lo que hay (en el marco de nuestra analogía bidimensional). Las regiones que quedan fuera de la membrana sólo sirven para reflejar lo inadecuado de esta ilustración, que representa este espacio en forma de U como si fuera un objeto que se encuentra dentro de nuestro universo de dimensión superior. El *wormhole* crea un nuevo espacio y, por lo tanto, anuncia un nuevo territorio espacial.

¿Existen los *wormholes* en el universo? Nadie lo sabe. Desde luego, si existen, no está nada claro si adoptarían únicamente una forma microscópica, o si podrían atravesar amplias regiones del universo (como en *Deep Space Nine*). Pero un elemento esencial a la hora de valorar si son realidad o ficción es determinar si la estructura del espacio se puede rasgar o no.

Los agujeros negros proporcionan otro ejemplo indiscutible en el que la estructura del universo se estira hasta sus últimos límites. En la Figura 3.7, vimos que el enorme campo gravitatorio de un agujero negro se despliega con una curvatura tan extremada que la estructura del espacio *parece* estar comprimida o perforada en el centro del agujero negro. A diferencia de lo que sucede en el caso de los *wormholes*, hay pruebas experimentales contundentes que apoyan la existencia de los agujeros negros, por lo que la cuestión relativa a qué sucede realmente en su punto central es científica, no especulativa. Una vez más, las fórmulas de la relatividad general se derrumban ante estas condiciones tan extremas. Algunos físicos han sugerido que hay realmente una perforación, pero que estamos protegidos de esta «singularidad» cósmica por el horizonte de sucesos del agujero negro, que impide que cualquier cosa escape de su atracción gravitatoria. Este razonamiento llevó a Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, a especular sobre una «hipótesis de censura cósmica» que permite la existencia de este tipo de irregularidades espaciales sólo si están profundamente escondidas de nuestra vista tras el velo de un horizonte de sucesos. Por otra parte, con anterioridad al descubrimiento de la teoría de cuerdas, algunos físicos hacían conjeturas sobre la idea de que una fusión de la mecánica cuántica y la relatividad general mostrarían que la aparente perforación del espacio está en realidad alisada —«remendada», por decirlo así— por consideraciones cuánticas.

Con el descubrimiento de la teoría de cuerdas y la armoniosa fusión de la mecánica cuántica y la gravedad, estamos finalmente preparados para estudiar estas cuestiones. Hasta la fecha, los expertos en teoría de cuerdas no han sido capaces de dar respuestas de una manera totalmente satisfactoria, pero durante los últimos años, *tenemos* resueltas algunas cuestiones íntimamente relacionadas. En este capítulo explicamos cómo la teoría de cuerdas, por primera vez, demuestra de una manera

definitiva que existen circunstancias físicas —diferentes, en cierto modo, de los *wormholes* y de los agujeros negros— en las que la estructura del universo *puede* rasgarse.

Una Posibilidad tentadora

En 1987, Shing-Tung Yau y su discípulo Gang Tian, que trabaja actualmente en el *Massachusetts Institute of Technology*, realizaron una interesante observación matemática. Descubrieron, utilizando un conocido procedimiento matemático, que ciertas formas de Calabi-Yau se podían transformar en otras perforando su superficie y luego remendando el agujero resultante según un patrón matemático preciso.[95] Dicho en pocas palabras, identificaron un tipo particular de esfera bidimensional —como la superficie de un balón de playa— situada dentro de un espacio inicial de Calabi-Yau, como se representa en la Figura 11.2. (Un balón de playa, como todos los objetos que nos resultan familiares, es tridimensional. No obstante, aquí nos referimos solamente a su superficie; ignoramos el espesor del material del que está hecho, así como el espacio que encierra en su interior. Los puntos situados sobre la superficie del balón de playa se pueden ubicar dando dos números —«latitud» y «longitud»— del mismo modo que ubicamos los puntos que se encuentran sobre la superficie terrestre. Ésta es la razón por la cual la *superficie* del balón de playa, como la superficie de la manguera que mencionábamos en el capítulo anterior, es bidimensional).

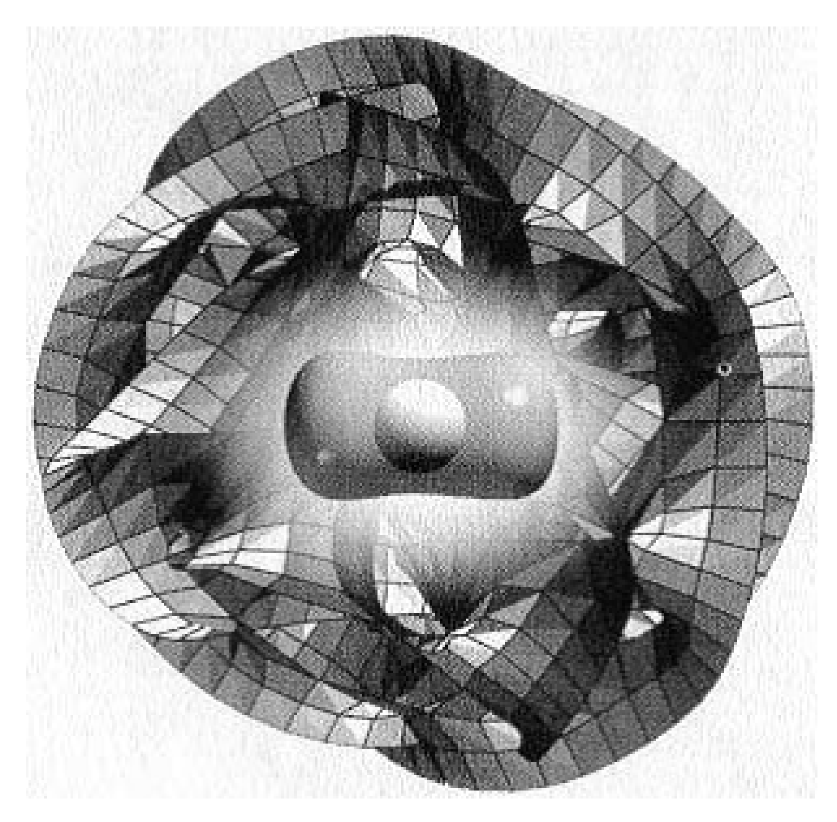


Figura 11.2 La región iluminada dentro de una forma de Calabi-Yau contiene una esfera.

A continuación consideraron hacer que la esfera se contrajera hasta quedar comprimida en un punto, como se ilustra mediante la sucesión de formas de la Figura 11.3. Esta figura, y las siguientes en este capítulo, se han simplificado resaltando la «pieza» más importante de la forma de Calabi-Yau, pero hemos de tener presente que estas transformaciones de la forma tienen lugar dentro de un espacio de Calabi-Yau algo más grande, como se ve en la Figura 11.2. Finalmente, Tian y Yau imaginaron que el espacio de Calabi-Yau se rasgaba ligeramente en la zona más comprimida (Figura 11.4 a), abriéndose y adhiriéndose a otra forma similar a un balón de playa (Figura 11.4 b) que luego podían volver a inflar hasta conseguir una hermosa forma hinchada (Figura 11.4 c y 11.4 d).

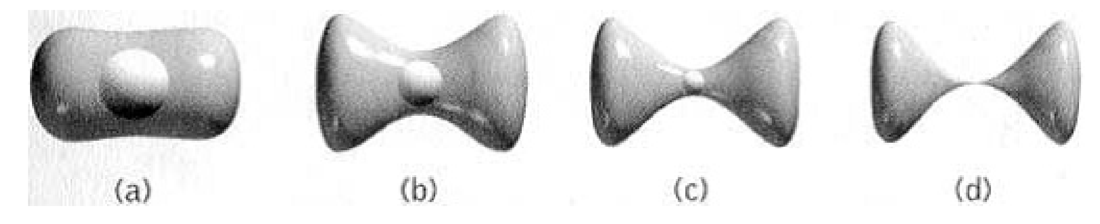


Figura 11.3 Una esfera dentro de un espacio Calabi-Yau se encoge hasta ser un punto, comprimiendo la estructura del espacio. Simplificamos esto y las figuras siguientes mostrando sólo una parte de la forma de Calabi-Yau total.

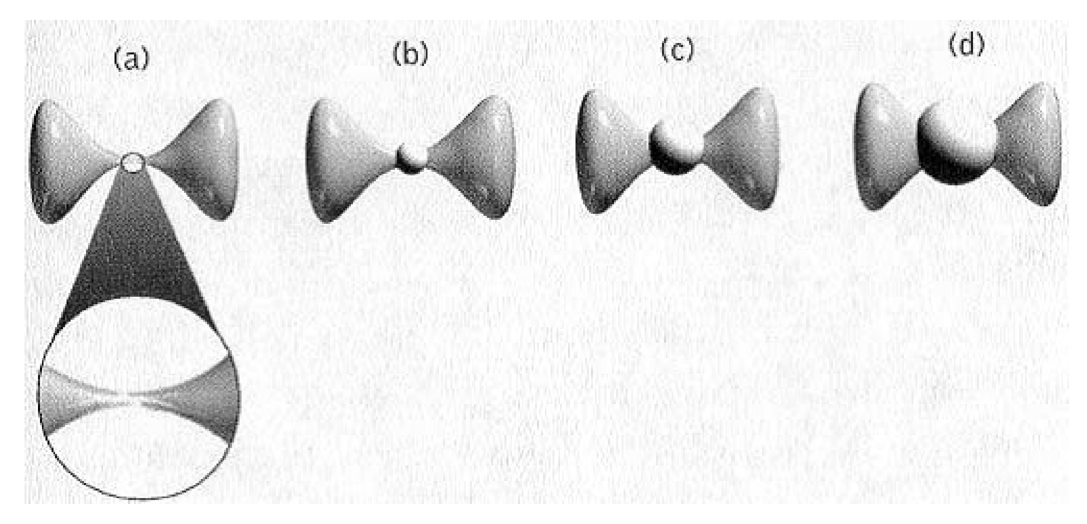


Figura 11.4 Un espacio de Calabi-Yau comprimido se abre y crece en él una esfera que se infla alisando su superficie. La esfera original de la Figura 11.3 se ha «ablandado».

Los matemáticos llaman a esta sucesión de manipulaciones una transición blanda *(flop-transition)*. Es como si la forma original del balón de playa se «ablandara» llegando a una nueva orientación dentro de la forma global de Calabi-Yau. Yau, Tian y otros observaron que, en determinadas circunstancias, la nueva forma de Calabi-Yau producida por un decaimiento, como se ve en la Figura 11.4 (d), es *topológicamente diferente* de la forma inicial de Calabi-Yau que se representa en la Figura 11.3 (a). Es una bonita manera de decir que no hay absolutamente ningún modo de deformar el espacio inicial de Calabi-Yau de la Figura 11.3 (a) para producir el espacio final de Calabi-Yau que se muestra en la Figura 11.4 (d) sin rasgar la estructura del espacio de Calabi-Yau en alguna etapa intermedia.

Desde un punto de vista matemático, este procedimiento de Yau y Tian tiene interés ya que proporciona un modo de producir nuevos espacios de Calabi-Yau a partir de otros que ya se conocían. Sin embargo, su potencial real está en el ámbito de la física, donde hace surgir una pregunta intrigante y seductora: ¿podría ser que, además de ser un procedimiento matemático abstracto, la sucesión que se extiende desde la Figura 11.3 (a) hasta la Figura 11.4 (d) pudiera darse realmente en la naturaleza? ¿Podría ser que, en contra de las expectativas de Einstein, la estructura del universo *pudiera rasgarse y posteriormente ser reparada* del modo en que se ha descrito?

La perspectiva del espejo

Después de la observación que formuló en 1987, Yau me estuvo animando, en repetidas ocasiones durante un par de años, a reflexionar sobre la posible

materialización física de estas transiciones blandas. No lo hice. Me parecía que las transiciones blandas eran sencillamente un tema de las matemáticas abstractas sin relación alguna con la física de la teoría de cuerdas. De hecho, según la discusión realizada en el capítulo 10 en la que descubrimos que las dimensiones circulares tienen un radio mínimo, podríamos sentirnos tentados de decir que la teoría de cuerdas no permite que la esfera de la Figura 11.3 se reduzca continuamente hasta llegar a ser un punto sin dimensión. Pero, hemos de recordar, según se dijo también en el capítulo 10, que si un pedazo del espacio se colapsa —en este caso una pieza esférica de una forma de Calabi-Yau— en un sentido opuesto al colapso de una dimensión espacial completa, el razonamiento que identifica el radio pequeño y el radio grande no es aplicable directamente. No obstante, aunque esta idea de descartar las transiciones blandas no pueda someterse a escrutinio, la posibilidad de que la estructura del espacio pudiera rasgarse seguía pareciendo bastante improbable.

Pero entonces, en 1991, el físico noruego Andy Lütken junto con Paul Aspinwall, un compañero mío de clase de Oxford, de la escuela para graduados, y actualmente profesor en la Universidad de Duke, se plantearon a sí mismos lo que resultó ser una pregunta muy interesante: si la estructura espacial de la porción de Calabi-Yau de nuestro universo sufriera una transición blanda con rasgado del espacio, ¿qué aspecto tendría desde la perspectiva del espacio-espejo de Calabi-Yau? Para comprender qué es lo que motiva esta pregunta, hemos de recordar que la física que emerge de los componentes de una pareja-espejo de formas de Calabi-Yau (previamente seleccionada según las dimensiones adicionales) es idéntica en ambos, pero la complejidad de las matemáticas que un físico debe emplear para extraer esas propiedades físicas puede diferir significativamente de un componente a otro. AspinwalI y Lütken hicieron especulaciones sobre el hecho de que la transición blanda, tan complicada matemáticamente, de las Figuras 11.3 y 11.4 podría tener una descripción mucho más sencilla utilizando la idea de espejo, una descripción que podría dar una visión más transparente sobre las propiedades físicas asociadas.

En la época en que estos físicos realizaron su trabajo, la simetría especular no se comprendía con la profundidad requerida para responder a la pregunta que ellos planteaban. Sin embargo, Aspinwall y Lütken observaron que no parecía haber nada en la descripción del espejo que indicara una consecuencia física desastrosa asociada a los rasgados espaciales de las transiciones blandas. Hacia la misma época, el trabajo que habíamos realizado Plesser y yo en cuanto a encontrar parejas-espejo de formas de Calabi-Yau (véase el capítulo 10) nos indujo inesperadamente a reflexionar asimismo sobre las transiciones blandas. Es un hecho matemático muy conocido que la unión de varios puntos como se veía en la Figura 10.4 —el procedimiento que habíamos utilizado para construir parejas-espejo— conduce a situaciones geométricas que son idénticas a las de pinzamiento y perforación de las Figuras 11.3 y 11.4. No

obstante, físicamente Plesser y yo no pudimos hallar ninguna calamidad asociada a dichas situaciones. Además, inspirados por las observaciones de Aspinwall y Lütken (así como por una publicación anterior que estos realizaron junto con Graham Ross), constatamos que podíamos reparar matemáticamente el pinzamiento de dos formas diferentes. Una de ellas nos condujo a la forma de Calabi-Yau de la Figura 11.3 (a), mientras que la otra nos llevaba a la de la Figura 11.4 (d). Esto nos sugirió que la evolución desde la Figura 11.3 (a) a la Figura 11.4 (d) era algo que podía suceder realmente en la naturaleza.

A finales de *1991*, al menos unos pocos expertos en teoría de cuerdas tenían una fuerte intuición de que la estructura del espacio *podía* rasgarse. Pero ninguno poseía la habilidad técnica necesaria para demostrar o refutar definitivamente esta sorprendente posibilidad.

Avanzando poco a poco

Una y otra vez durante 1992, Plesser y yo intentamos demostrar que la estructura del espacio puede experimentar transiciones blandas con rasgado del espacio. Nuestros cálculos produjeron trocitos y fragmentos de pruebas circunstanciales que apoyaban esta idea, pero no pudimos hallar una demostración definitiva. En algún momento durante la primavera, Plesser visitó el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton para dar una conferencia, y le habló en privado a Witten sobre nuestros intentos de hallar las matemáticas de las transiciones blandas con rasgado del espacio dentro del marco de la teoría de cuerdas. Después de resumir nuestras ideas, Plesser esperó expectante la respuesta de Witten. Éste se volvió desde la pizarra y miró por la ventana de su despacho. Después de un minuto de silencio, o tal vez dos, se volvió hacia Plesser y le dijo que, si nuestras ideas funcionaban, «sería algo espectacular». Esto hizo que nuestros esfuerzos se reanimaran. Pero, después de un tiempo, dado que nuestros progresos se habían estancado, cada uno de nosotros se dedicó a trabajar sobre otros proyectos dentro de la teoría de cuerdas.

A pesar de todo, me encontré a mí mismo reflexionando de nuevo sobre la posibilidad de las transiciones blandas con rasgado del espacio. A medida que transcurrían los meses, me sentía cada vez más seguro de que tenían que ser una parte esencial de la teoría de cuerdas. Los cálculos preliminares que habíamos efectuado Plesser y yo, junto con unas esclarecedoras discusiones mantenidas con David Morrison, un matemático de la Universidad de Duke, hacían parecer como muy probable que ésta fuera la única conclusión que respaldaba la simetría especular de

forma natural. De hecho, durante una visita a Duke, Morrison y yo, con algunas valiosas observaciones de Sheldon Katz de la Universidad del Estado de Oklahoma, que también visitaba Duke en aquel momento, esbozamos una estrategia para demostrar que las transiciones blandas pueden producirse en la teoría de cuerdas. Sin embargo, cuando nos sentamos para realizar los cálculos necesarios, nos encontramos con que éstos eran extraordinariamente largos y complicados. Incluso en el ordenador más rápido del mundo, podía llevar más de un siglo realizarlos completamente. Habíamos progresado, pero claramente necesitábamos una idea nueva, una que pudiera incrementar en gran medida la eficiencia de nuestro método de cálculo. Inconscientemente, Victor Batyrev, un matemático de la Universidad de Essen, reveló esa idea en un par de artículos que se publicaron en la primavera y el verano de 1992. Batyrev había llegado a estar muy interesado en la simetría especular, especialmente después del éxito de Candelas y sus colaboradores cuando la utilizaron para resolver el problema del recuento de esferas explicado al final del capítulo 10.

Con su perspectiva de matemático, Batyrev se sentía incómodo por los métodos a los que Plesser y yo habíamos recurrido para hallar parejas-espejo de espacios de Calabi-Yau. Aunque nuestro planteamiento utilizaba herramientas que a los estudiosos de la teoría de cuerdas les resultaban familiares, Batyrev me comentó posteriormente que nuestro trabajo le había parecido «magia negra». Esto refleja la gran división cultural existente entre la física y las matemáticas, y además, puesto que la teoría de cuerdas difumina sus fronteras, las amplias diferencias en cuanto a lenguaje, métodos y estilos de estas disciplinas se hacen cada vez más evidentes. Los físicos son más bien como los compositores vanguardistas, que desean doblegar las reglas tradicionales y rozan el límite de lo aceptable en su intento de buscar soluciones. Los matemáticos son como compositores clásicos, que trabajan habitualmente dentro de un marco mucho más estrecho, y son reacios a dar el paso siguiente hasta que todos los anteriores se han demostrado con el rigor debido. Cada una de estas posturas tiene sus ventajas y sus inconvenientes; cada una de ellas aporta una salida única para los descubrimientos creativos. Como la música clásica y la moderna, no es que un planteamiento sea correcto y el otro sea erróneo, sino que los métodos que se eligen para su utilización dependen en gran medida de los gustos y de la formación de cada uno.

Batyrev optó por rehacer la construcción de variedades de espejo dentro de un marco matemático más convencional, y tuvo éxito. Inspirándose en un trabajo anterior de Shi-Shyr Roan, un matemático de Taiwan, halló un procedimiento matemático sistemático para producir pares de espacios de Calabi-Yau que son espejos el uno del otro. Su construcción se reduce al procedimiento que Plesser y yo habíamos descubierto en los ejemplos que habíamos considerado, pero ofrece un marco más general que se expresa de un modo más familiar para los matemáticos.

El aspecto más sensacional es que los trabajos de Batyrev hacen uso de áreas de las matemáticas con las que la mayoría de los físicos nunca habían entrado en contacto previamente. En mi caso, por ejemplo, pude extraer lo más esencial de sus argumentos, pero tenía considerables dificultades para entender muchos detalles cruciales. Sin embargo, una cosa estaba clara: los métodos de su trabajo, si se entendían y aplicaban adecuadamente, podían abrir una nueva línea de ataque para el tema de las transiciones blandas con rasgado del espacio.

Hacia finales del verano, animado por estos avances, decidí volver a trabajar el problema de las transiciones blandas con una intensidad concentrada y total. Morrison me había dicho que iba a dejar la Universidad de Duke para pasar un año en el Instituto de Estudios Avanzados, y me enteré de que Aspinwall también iba a estar allí, como becario posdoctoral. Después de unas cuantas llamadas telefónicas y unos cuantos mensajes por correo electrónico, conseguí un permiso para ausentarme de la *Cornell University* y pasar también el final de 1992 en el Instituto de Estudios Avanzados.

Surge una estrategia

Sería difícil imaginarse un lugar mejor para pasar largas horas de intensa concentración que el Instituto de Estudios Avanzados. Fundado en 1930, está situado entre campos con suaves ondulaciones del terreno en los límites de un bosque idílico, a unos pocos kilómetros del campus de la Universidad de Princeton. Se dice que en este lugar nadie puede distraerse de su trabajo, sencillamente porque, bueno, no hay nada con lo que distraerse.

Después de marcharse de Alemania en 1933, Einstein entró a trabajar en el Instituto de Estudios Avanzados y permaneció allí durante el resto de su vida. No hace falta mucha imaginación para representárselo meditando sobre la teoría unificada de campos en los tranquilos, solitarios y casi ascéticos alrededores del instituto. Una herencia de pensamiento profundo impregna la atmósfera, la cual, dependiendo del propio estado de ánimo en cuanto a la marcha del trabajo, puede resultar estimulante u opresiva.

Poco después de llegar al instituto, Aspinwall y yo caminábamos por *Nassau Street* (la principal calle comercial de la ciudad de Princeton) intentando ponernos de acuerdo sobre algún lugar para cenar. Esto no era una tarea fácil, ya que Paul es un devoto carnívoro y yo soy vegetariano. Mientras paseábamos, comunicándonos el uno al otro los aspectos relevantes de nuestras vidas, me preguntó si había pensado ya

sobre algún nuevo proyecto de trabajo. Le dije que sí y le hablé de mi convencimiento en relación con la importancia de demostrar que el universo, si la teoría de cuerdas lo describe de forma correcta, puede experimentar transiciones blandas con rasgado del espacio. También subrayé la estrategia que había estado desarrollando, así como mi renacida esperanza en que el trabajo de Batyrev nos permitiera hallar las piezas que faltaban. Pensé que lo que estaba haciendo era predicar a alguien que ya estaba convencido, y que a Paul le emocionaría esta perspectiva. Pero no fue así. En retrospectiva, su reticencia se debía en gran parte a nuestra justa intelectual, bien intencionado y de larga duración, en el que cada uno hacía de abogado del diablo con respecto a las ideas del otro. Pasados unos cuantos días, me dio la razón y concentramos toda nuestra atención en las transiciones blandas.

Para entonces, Morrison también había llegado y los tres nos reunimos en la cafetería del instituto para diseñar una estrategia. Estábamos de acuerdo en que el objetivo central era determinar si la evolución desde la Figura 11.3 (a) hasta la Figura 11.4 (d) podía realmente producirse en nuestro universo. Pero estaba vedado atacar directamente la cuestión, porque las ecuaciones que describían esta evolución eran extremadamente difíciles, sobre todo en el momento en que se producía el rasgado espacial. En vez de intentarlo así, optamos por reelaborar el tema utilizando la descripción del espejo, con la esperanza de que las ecuaciones correspondientes pudieran ser más manejables. Esto se ilustra esquemáticamente en la Figura 11.5, en la que la fila superior representa la evolución original de la Figura 11.3 (a) hasta la Figura 11.4 (d), y la fila inferior es la misma evolución desde la perspectiva de las formas de Calabi-Yau especulares. Como varios de nosotros habíamos ya constatado, resulta que en el replanteo del espejo la física de cuerdas se comporta perfectamente bien y no se tropieza con situaciones de catástrofe. Como se puede ver, en la fila inferior de la Figura 11.5 no parece que haya ningún pinzamiento ni rasgado. Sin embargo, para nosotros, la auténtica pregunta que planteaba esta observación era la siguiente: ¿estábamos llevando la simetría especular más allá de los límites de su aplicabilidad? Aunque las formas de Calabi-Yau superior e inferior dibujadas en el extremo izquierdo de la Figura 11.5 producen propiedades físicas idénticas, ¿es cierto que a cada paso que damos en la evolución hacia el lado derecho de la Figura 11.5 —pasando necesariamente por las fases intermedias de pinzar, rasgar y reparar— las propiedades físicas de la perspectiva original y de la perspectiva del espejo son idénticas?

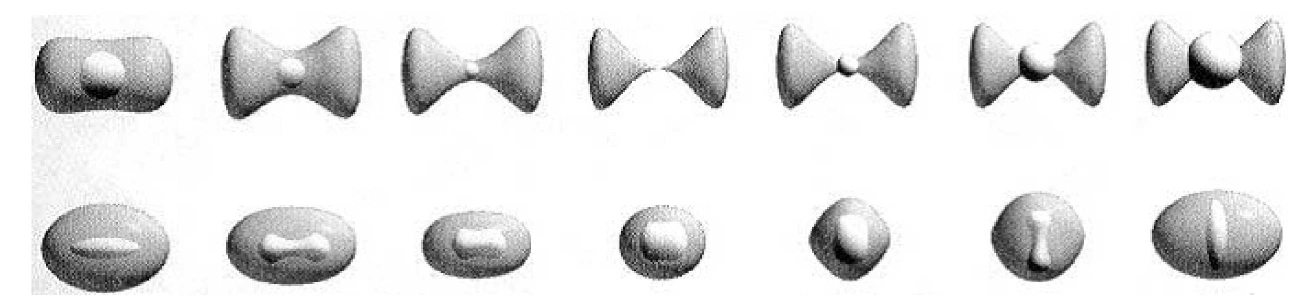


Figura 11.5 Una transición blanda con rasgado del espacio (fila superior) y su supuesto replanteo en el espejo (fila inferior).

Aunque teníamos razones sólidas para creer que la poderosa relación de espejo se mantiene durante la progresión de formas que nos lleva al rasgado en la forma de Calabi-Yau de la parte superior de la Figura 11.5, nos dimos cuenta de que nadie sabía si las formas de Calabi-Yau superior e inferior de dicha Figura 11.5 continúan en la relación de espejo después de producirse el rasgado. Esta cuestión es crucial, ya que si lo están, entonces la ausencia de catástrofes en la perspectiva del espejo significaría que también se da dicha ausencia en el original, y habríamos demostrado que el espacio puede rasgarse en la teoría de cuerdas. Constatamos que esta cuestión se podía reducir a unos cálculos: extraer las propiedades físicas del universo para la forma de Calabi-Yau superior después del rasgado (utilizando, por ejemplo, la forma de Calabi-Yau superior derecha de la Figura 11.5 y también para su supuesto espejo (la forma de Calabi-Yau de la parte inferior derecha de la Figura 11.5), y ver si son idénticas.

A estos cálculos nos dedicábamos Aspinwall, Morrison y yo a finales de 1992.

Últimas noches en el refugio final de Einstein

El intelecto de Edward Witten, afilado como una navaja, se viste con una conducta de hablar suavemente que a menudo tiene un matiz retorcido, casi irónico. Muchos le consideran el sucesor de Einstein en el papel de físico vivo más importante del mundo. Algunos incluso irían más lejos y lo considerarían el físico más grande de todos los tiempos. Tiene un apetito insaciable por los problemas físicos más controvertidos y ejerce una influencia tremenda en el establecimiento de la dirección en que ha de moverse la investigación dentro de la teoría de cuerdas.

La envergadura y profundidad de la productividad de Witten es legendaria. Su esposa, Chiara Nappi, que es asimismo física en el Instituto de Estudios Avanzados, hace un retrato de Witten sentado a la mesa de la cocina, comprobando mentalmente alguna novedad de la teoría de cuerdas, recurriendo sólo esporádicamente a tomar

pluma y papel para verificar uno o dos detalles escurridizos.[96] Hay otra historia que cuenta un becario posdoctoral que, durante un verano, tuvo su despacho contiguo al de Witten. Describe la yuxtaposición inquietante de una lucha laboriosa con complejos cálculos de teoría de cuerdas sentado a la mesa de su despacho, mientras oía el ritmo incesante del teclado de Witten, y cómo una publicación tras otra se introducían directamente desde la mente al archivo del ordenador.

Más o menos una semana después de mi llegada, Witten y yo estábamos charlando en el patio del instituto y él me preguntó por mis proyectos de investigación. Le hablé sobre las transiciones blandas con rasgado del espacio y la estrategia que estábamos planeando para continuar el trabajo. Se le iluminó la cara al enterarse de nuestro proyecto, pero advirtió que pensaba que los cálculos iban a ser terriblemente difíciles. También señaló un posible punto débil en la estrategia que yo le había descrito. Esto tenía que ver con un trabajo que yo había hecho unos pocos años antes con Vafa y Warner. El tema que planteó resultó ser solamente tangencial con respecto a nuestro planteamiento para comprender las transiciones blandas, pero le hizo comenzar a reflexionar sobre aspectos que finalmente resultaron ser temas relacionados y complementarios.

Aspinwall, Morrison y yo decidimos dividir nuestros cálculos en dos partes. Al principio, una división natural podía aparentemente consistir en extraer primero las propiedades físicas relacionadas con la forma final de Calabi-Yau correspondiente a la fila superior de la Figura 11.5, y después hacer lo mismo con la forma final de Calabi-Yau correspondiente a la fila inferior de la Figura 11.5. Si la relación de espejo no se iba a pique debido al rasgado en la forma de Calabi-Yau de la fila superior, las dos formas de Calabi-Yau finales deberían ofrecer las mismas propiedades físicas exactamente igual que las dos formas de Calabi-Yau iniciales a partir de las cuales habían evolucionado. (Esta forma de replantear el problema evita tener que efectuar cualquiera de esos cálculos dificilísimos relativos a la fase del rasgado en la forma de Calabi-Yau de la fila superior). En cambio, resulta muy sencillo calcular las propiedades físicas asociadas a la forma de Calabi-Yau que aparece al final de la fila superior. La dificultad real para llevar adelante este programa está en averiguar la *forma exacta* del espacio de Calabi-Yau que aparece al final de la fila inferior de la Figura 11.5 —el espejo putativo de la forma de Calabi-Yu de la fila superior— y en extraer después las propiedades físicas asociadas.

Un procedimiento para llevar a cabo la segunda tarea —extraer las características físicas del espacio final de Calabi-Yau de la fila inferior, una vez que se conoce su forma con precisión— era el que había desarrollado Candelas unos pocos años antes. Sin embargo, su planteamiento era complicado en cuanto a los cálculos y nos dimos cuenta de que se requeriría un programa informático muy avanzado para aplicarlo a nuestro ejemplo concreto. Aspinwall, que además de ser un físico de renombre es un

programador de primera, asumió esta tarea. Morrison y yo emprendimos la realización de la primera tarea, a saber, identificar la forma precisa del supuesto espacio-espejo de Calabi-Yau.

Entonces fue cuando comprendimos que el trabajo de Batyrev nos podía proporcionar algunas claves importantes. Sin embargo, una vez más, la división cultural existente entre las matemáticas y la física —en este caso, entre Morrison y yo — empezó a obstaculizar el progreso. Necesitábamos unir los potenciales de ambos campos para hallar la forma *matemática* de las formas de Calabi-Yau de la fila inferior que tendrían que corresponder al mismo universo *físico* que las formas de Calabi-Yau de la fila superior, suponiendo que los rasgados blandos estuvieran dentro del repertorio de la naturaleza. Pero ninguno de nosotros dominaba el lenguaje del otro lo suficiente como para ver claramente la manera de alcanzar el objetivo. Nos resultaba obvio a ambos que teníamos que afinar la puntería: cada uno de nosotros necesitaba recibir un curso acelerado sobre el campo de conocimientos del otro. En consecuencia, decidimos pasarnos los días llevando hacia delante nuestros cálculos lo mejor que podíamos, mientras que por la noche hacíamos de profesor y estudiante en clases particulares de un solo alumno: yo le enseñaría a Morrison durante una hora o dos lo más relevante de la física; después él me explicaría durante una hora o dos lo más relevante de las matemáticas. Las clases solían acabar hacia las once de la noche.

Nos atuvimos al programa un día tras otro. El avance era lento, pero podíamos percibir que las cosas empezaban a encajar. Entretanto, Witten realizaba significativos progresos en la reformulación del punto débil que había detectado con anterioridad. Su trabajo estaba consiguiendo establecer un nuevo y más potente método de traducción entre la física de la teoría de cuerdas y las matemáticas de los espacios de Calabi-Yau. Aspinwall, Morrison y yo teníamos casi a diario unas reuniones improvisadas con Witten en las que nos mostraba las nuevas ideas que se derivaban de su planteamiento. A medida que transcurrían las semanas, se veía poco a poco cada vez más claro que, en contra de lo que podía esperarse, su trabajo, enfocado desde un punto de vista completamente distinto del nuestro, iba convergiendo hacia el tema de las transiciones blandas. Aspinwall, Morrison y yo nos dimos cuenta de que, si no terminábamos pronto nuestros cálculos, Witten acabaría por ganarnos de mano.

Sobre latas de cerveza y fines de semana trabajando

Nada estimula tanto la mente de un físico como una saludable dosis de competición.

Aspinwall, Morrison y yo subimos un cambio para trabajar a toda máquina. Es importante aclarar que esto tenía un significado con respecto a Morrison y yo, pero significaba algo bastante diferente en el caso de Aspinwall. Éste es una curiosa mezcla de la sensibilidad de las clases altas británicas, lo cual es en gran medida un reflejo de la década que pasó en Oxford antes y después de licenciarse, y de una cierta picardía de bromista que impregna muy ligeramente su carácter. Por lo que se refiere a sus hábitos de trabajo, quizá sea el físico más civilizado que conozco. Mientras muchos de nosotros trabajamos hasta altas horas de la noche, él nunca trabaja después de las 5 de la tarde. Mientras muchos trabajamos los fines de semana, Aspinwall nunca lo hace. Se las arregla así porque es agudo y eficiente. Para él, subir un cambio sólo significa llevar su nivel de eficiencia a una altura aún mayor.

Estábamos a primeros de diciembre. Morrison y yo nos habíamos dado clase mutuamente durante varios meses y estábamos empezando a ver los frutos. Nos encontrábamos muy cerca de ser capaces de identificar la forma exacta del espacio de Calabi-Yau que buscábamos. Además, Aspinwall justo había terminado su código informático y estaba a la espera de nuestros resultados, que habrían de ser los datos necesarios para aplicar su programa. Fue un miércoles por la noche cuando Morrison y yo llegamos finalmente a estar seguros de que sabíamos cómo identificar la forma de Calabi-Yau buscada. Esto se reducía a un procedimiento que requería su propio, medianamente simple, programa de computadora. A primeras horas de la tarde del viernes habíamos escrito el programa y lo habíamos limpiado de errores; a últimas horas de la noche ya teníamos nuestros resultados.

Pero eran más de las 5 de la tarde y, además, viernes. Aspinwall se había ido a casa y no volvería hasta el lunes. No podíamos hacer absolutamente nada sin su código informático. Ni a Morrison ni a mí nos entraba en la cabeza que tuviéramos que esperar todo el fin de semana. Estábamos a punto de dar respuesta a la cuestión de los rasgados espaciales en la estructura del cosmos, algo a lo que habíamos dado tantas vueltas durante mucho tiempo, y el suspenso era demasiado para soportarlo. Llamamos a Aspinwall a su casa. Al principio se negó a acudir a trabajar a la mañana siguiente tal como le pedíamos. Pero luego, después de mucho refunfuñar, consintió en unirse a nosotros, siempre y cuando le compráramos un paquete de seis latas de cerveza. Nosotros accedimos.

La hora de la verdad

Tal como habíamos quedado, nos encontramos en el instituto el sábado por la

mañana. Era una resplandeciente mañana soleada y la atmósfera era burlonamente relajada. Al menos yo estaba temiendo que Aspinwall no apareciera; una vez que llegó, me pasé 15 minutos ensalzando el hecho importante de que era el primer fin de semana que Aspinwall había acudido a trabajar. Me aseguró que no volvería a suceder.

Nos apiñamos todos alrededor del ordenador de Morrison en el despacho que él y yo compartíamos. Aspinwall le dijo a Morrison lo que tenía que hacer para poner el programa en la pantalla y nos mostró cuál era la forma en que había que introducir los datos. Morrison formateó adecuadamente los resultados que habíamos conseguido la noche anterior y nos pusimos en marcha.

El cálculo concreto que estábamos efectuando consistía, dicho en pocas palabras, en determinar la masa de una cierta clase de partículas —un patrón vibratorio específico de una cuerda— cuando se desplazaban por un universo cuya componente de Calabi-Yau habíamos identificado con nuestro trabajo de todo el otoño. Esperábamos, en la línea de la estrategia que hemos comentado anteriormente, que esta masa coincidiría exactamente con un cálculo similar realizado sobre la forma de Calabi-Yau que surgía de la transición blanda con rasgado del espacio. Este era el cálculo que resultaba relativamente fácil de hacer y lo habíamos terminado unas cuantas semanas antes; la respuesta resultó ser 3, en las unidades especiales que estábamos utilizando. Dado que en aquel momento estábamos realizando el pretendido cálculo de espejo numéricamente en un ordenador, esperábamos conseguir algo extraordinariamente aproximado, pero no exactamente 3, sino algo como 3,000001 o 2,999999, con esa pequeñísima diferencia debida a los errores de redondeo.

Morrison se sentó al ordenador con su dedo revoloteando sobre la tecla de intro. Con una tensión que aumentaba por momentos dijo, «Allá va», y puso el cálculo en marcha. En un par de segundos el ordenador dio la respuesta: 8.999999. Me sentí hundido. ¿Podía ser que las transiciones blandas con rasgado del espacio destrozaran la relación de espejo, como si indicaran que dichas transiciones no podían existir en la realidad? Sin embargo, casi inmediatamente, todos nos dimos cuenta de que estaba pasando algo raro. Si existía una discrepancia real en las propiedades físicas que se deducían de las dos formas, era extremadamente improbable que el cálculo del ordenador pudiera dar una respuesta tan próxima a un número entero. Si nuestras ideas estaban equivocadas, no había absolutamente ninguna razón para esperar algo distinto de un conjunto aleatorio de dígitos. Habíamos obtenido una respuesta errónea, pero ésta sugería, quizá, que se trataba de algún simple error aritmético que habíamos cometido. Aspinwall y yo fuimos a la pizarra y, en un momento hallamos nuestra equivocación: habíamos omitido un factor 3 en el cálculo «más sencillo» que habíamos efectuado unas semanas antes; el verdadero resultado era 9. La respuesta

del ordenador era por lo tanto justo lo que deseábamos.

Desde luego, la coincidencia a posteriori resultaba convincente sólo de una forma marginal. Cuando uno conoce la respuesta que desea obtener, a menudo es demasiado fácil diseñar un método para conseguirla. Necesitábamos hacer otro ejemplo. Como ya teníamos escrito todo el código informático necesario, no iba a resultar muy difícil hacerlo. Nos pusimos a calcular la masa de otra partícula en la forma de Calabi-Yau de la fila superior, poniendo esta vez mucho cuidado para no cometer errores. Obtuvimos la respuesta: 12. Una vez más nos apiñamos todos alrededor del ordenador y lo pusimos en marcha. Unos segundos más tarde nos dio el número 11,999999. *Coincidencia*. Habíamos demostrado que el supuesto espejo era en verdad el espejo y, por consiguiente, las transiciones blandas con rasgado del espacio son parte de la física de la teoría de cuerdas.

Ante esto, me puse en pie de un salto y di una vuelta al despacho corriendo en señal de victoria. Morrison mostraba una sonrisa radiante desde detrás del ordenador. Sin embargo, la reacción de Aspinwall fue bastante diferente. «Todo esto es fabuloso, pero yo ya sabía que iba a funcionar», dijo con mucha calma. «¿Y dónde está mi cerveza?».

El planteamiento de Witten

El lunes siguiente, acudimos a Witten triunfalmente y le comunicamos nuestro éxito. Se sintió muy complacido por nuestros resultados. Además, resultaba que él también había descubierto precisamente un modo de demostrar que las transiciones blandas existen en la teoría de cuerdas. Su argumento era bastante diferente del nuestro y aclaraba significativamente la manera microscópica de explicar por qué los rasgados del espacio no tienen consecuencia catastrófica alguna.

Su planteamiento explica la diferencia existente entre una teoría de partículas puntuales y la teoría de cuerdas cuando tales rasgados se producen. La diferencia clave es que existen dos tipos de movimiento de cuerdas cerca del rasgado, pero sólo un tipo de movimiento de las partículas puntuales. En realidad, una cuerda puede desplazarse recorriendo una trayectoria adyacente al rasgado, como también lo hace una partícula puntual, pero además puede circunscribir el rasgado cuando se desplaza hacia delante, como se ilustra en la Figura 11.6. En esencia, el análisis de Witten revela que las cuerdas que envuelven el rasgado —algo que no puede suceder en una teoría de partículas puntuales— protegen el universo circundante de los efectos catastróficos que se producirían si no fuera así. Es como si la lámina universal de la

cuerda —recuérdese que en el capítulo 6 se dijo que esta lámina es una superficie bidimensional que una cuerda recorre mientras se desplaza a través del espacio— proporcionara una barrera protectora que contrarresta con precisión los aspectos catastróficos producidos por la degeneración geométrica de la estructura del espacio.

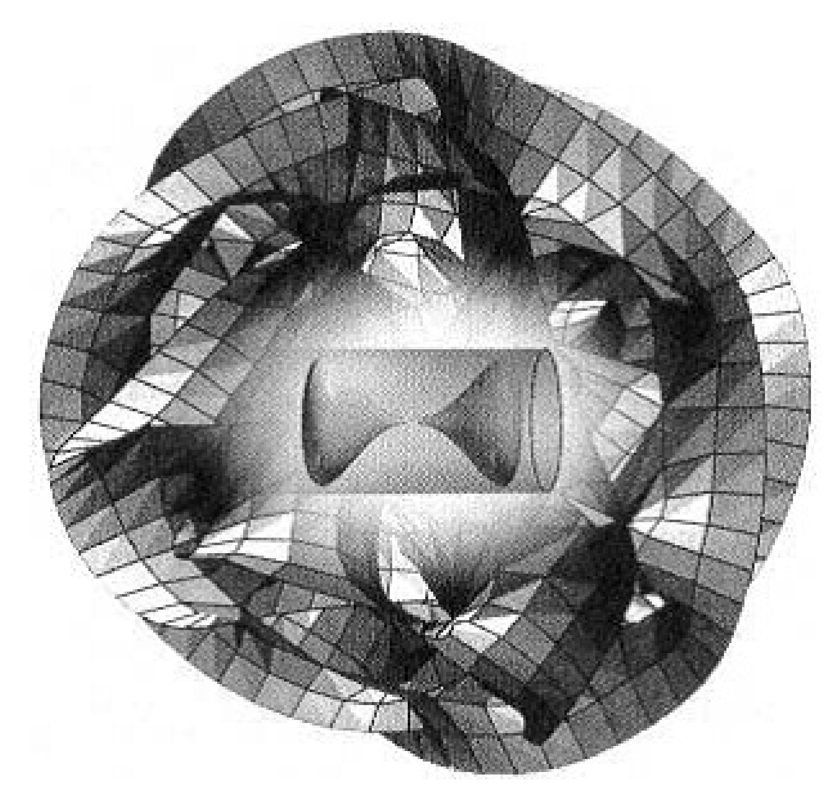


Figura 11.6 La lámina universal barrida por una cuerda provee un escudo que cancela los efectos potencialmente cataclísmicos asociados con una rajadura en la estructura del espacio.

Podríamos preguntamos qué sucedería si se produjera tal rasgado y en su proximidad no hubiera cuerdas que protegieran de sus efectos. Además, también podría preocuparnos que en el instante en que se produce un rasgado, una cuerda —un bucle infinitamente delgado— proporcionara una barrera tan poco eficaz que sólo sirviera para protegernos lo mismo que si nos escondiéramos tras un aro de hula hula ante el peligro de una granada de mano. La respuesta a estas cuestiones se basa en una característica central de la mecánica cuántica que ya comentamos en el capítulo 4. Allí vimos que, en la formulación de Feynman para la mecánica cuántica, un objeto, ya fuera una partícula o una cuerda, viaja de una posición a otra «olfateando» todas las trayectorias posibles. El movimiento resultante que se observa es una combinación de *todas* las posibilidades, de tal modo que las contribuciones relativas de cada trayectoria posible está determinada con precisión por las matemáticas de la mecánica cuántica. Si se produjera un rasgado en la estructura del espacio, entre las posibles trayectorias de las cuerdas que se desplazan estarían las que rodean el rasgado —unas trayectorias como las de la Figura 11.6—. Incluso si no parece que haya cuerdas cerca del rasgado cuando éste se produce, la mecánica cuántica

contempla los efectos físicos de todas las posibles trayectorias de cuerdas y entre éstas hay numerosas direcciones protectoras (de hecho, una cantidad infinita) que rodean el rasgado. Éstas son las contribuciones que Witten demostró con exactitud para contrarrestar la catástrofe cósmica que el rasgado en otro caso habría creado.

En enero de 1993, Witten y nosotros tres enviamos simultáneamente nuestros trabajos al archivo electrónico de Internet a través del cual los trabajos de física se hacen accesibles inmediatamente en todo el mundo. Los dos trabajos describen, desde nuestros muy diferentes puntos de vista, los primeros ejemplos de *transiciones modificadoras de la topología*, el nombre técnico que habíamos inventado para los procesos que incluían rasgados del espacio. La vieja pregunta sobre si la estructura del espacio se puede rasgar había hallado una respuesta cuantitativa a través de la teoría de cuerdas.

Consecuencias

Le hemos dado mucha importancia a la constatación de que los rasgados del espacio pueden producirse sin que ocurran catástrofes físicas. Pero *¿qué sucede* cuando la estructura espacial se rasga? ¿Cuáles son las consecuencias observables? Hemos visto que muchas de las propiedades del mundo que nos rodea dependen de la estructura detallada de las dimensiones arrolladas. En consecuencia, podríamos pensar que la transformación tremendamente drástica de un espacio de Calabi-Yau en otro tal como se muestra en la Figura 11.5 produciría un impacto físico significativo. Sin embargo, de hecho, los dibujos de dimensiones inferiores que utilizamos para visualizar los espacios hacen que la transformación parezca algo más complicada de lo que es realmente. Si pudiéramos visualizar la geometría de seis dimensiones, veríamos que es cierto que la estructura se está rasgando, pero lo hace de un modo muy suave. Se parece más a la obra de una polilla en un trozo de lana, que al hecho brusco de doblar completamente la rodilla en unos pantalones encogidos.

Nuestro trabajo y el de Witten demuestran que ciertas características físicas, tales como el número de las familias de vibraciones de cuerdas y los tipos de partículas que hay dentro de cada familia, no se ven afectadas por estos procesos. Cuando el espacio de Calabi-Yau sufre una evolución en la que interviene un rasgado, los que pueden resultar afectados son los valores exactos de las masas de las partículas individuales —las energías de los posibles patrones de vibraciones de cuerdas—. Nuestros trabajos demostraban que estas masas variarán continuamente, unas aumentando y otras disminuyendo, en respuesta a la forma geométrica cambiante de

la componente de Calabi-Yau del espacio. No obstante, lo que tiene una importancia primordial es el hecho de que no hay un salto catastrófico, ni pinchazos, ni otras características inusuales de estas masas variables, cuando se produce realmente el rasgado. Desde el punto de vista de la física, el momento en que se produce el rasgado no tiene características especiales.

A partir de este punto surgen dos cuestiones. En primer lugar, nos hemos centrado en los rasgados de la estructura espacial que se producen en la componente adicional de seis dimensiones de Calabi-Yau dentro del universo. ¿Pueden producirse estos rasgados también en las tres dimensiones extendidas que nos resultan más familiares? La respuesta, casi con toda seguridad, es sí. Después de todo, el espacio es el espacio, independientemente de que esté arrollado firmemente en una forma de Calabi-Yau o esté desplegado en la gran extensión del universo que percibimos en una noche clara y estrellada. De hecho, con anterioridad hemos visto que las dimensiones espaciales habituales podrían estar ellas mismas en realidad arrolladas en el molde de una forma gigante que se curva cerrándose sobre sí misma en dirección al otro lado del universo, y que por lo tanto incluso la distinción entre cuáles son las dimensiones que están arrolladas y cuáles están extendidas es algo artificial. Aunque nuestro análisis y el de Witten se basaban en ciertas características matemáticas especiales de las formas de Calabi-Yau, el resultado —el hecho de que la estructura del espacio puede rasgarse— tiene ciertamente unas aplicaciones potenciales más amplias.

En segundo lugar, un rasgado modificador de las propiedades topológicas, ¿podría suceder hoy o mañana? ¿Pudo haber sucedido en el pasado? Sí. Ciertas mediciones experimentales de las masas de partículas elementales ponen de manifiesto que sus valores son bastante estables en el transcurso del tiempo. Pero si nos vamos a las primeras épocas que siguieron al *big bang*, incluso las teorías no basadas en cuerdas hablan de importantes períodos durante los cuales las masas de las partículas elementales cambiaban en el transcurso del tiempo. Desde la perspectiva de la teoría de cuerdas, en estos períodos podían haberse dado los rasgados modificadores de la topología que ya hemos explicado en este capítulo. Acercándonos más al presente, la estabilidad observada en las masas de las partículas elementales implica que, si el universo está sufriendo actualmente un rasgado espacial con cambios en la topología, debe de estar haciéndolo con una lentitud extraordinaria, tan despacio que su efecto en las masas de las partículas elementales es menor que nuestra percepción experimental actual. Curiosamente, mientras esta condición se cumpliera, el universo podría estar actualmente en medio de una ruptura espacial. Si sucediera con una lentitud suficiente, ni siquiera nos enteraríamos de que está sucediendo. Éste es uno de esos raros casos de la física en los que la falta de un fenómeno claramente observable ocasiona una gran expectación. La no aparición de alguna consecuencia catastrófica observable que se pudiera derivar de una evolución

geométrica tan exótica da testimonio de lo mucho que ha sobrepasado la teoría de cuerdas a las expectativas de Einstein.

Más allá de las cuerdas: En busca de la Teoría-M

En su larga búsqueda de una teoría unificada, Einstein reflexionaba sobre si «Dios podía haber hecho el universo de un modo diferente; es decir, si la necesidad de sencillez lógica deja algo de libertad».[97] Con esta observación, Einstein articulaba la forma naciente de una opinión compartida actualmente por muchos físicos: si existe una teoría final de la naturaleza, uno de los argumentos más convincentes que apoyarían esta forma concreta sería que esa teoría no podría ser de otra manera. La teoría última habría de adoptar la forma que adoptaría, porque sería el único marco explicativo capaz de describir el universo sin chocar con incoherencias internas o absurdos lógicos. Una teoría así declararía que las cosas son como son porque *tienen* que ser de esa manera. Cualquier variación, con independencia de lo pequeña que pudiera ser, conduciría a una teoría que —como en la proposición «Esta sentencia es mentira»— sembraría las semillas de su propia destrucción.

El reconocimiento de esta inevitabilidad dentro de la estructura del universo nos obligaría a recorrer un largo camino hasta llegar a enfrentarnos a algunos de los interrogantes más profundos de todos los tiempos. Estos interrogantes ponen de relieve el misterio que rodea a la cuestión relativa a quién o qué eligió entre las aparentemente innumerables opciones que supuestamente eran necesarias para diseñar nuestro universo. La inevitabilidad responde a estos interrogantes borrando las opciones. Inevitabilidad significa que, en realidad, no hay opciones y declara que el universo no podría haber sido diferente. Como veremos en el capítulo 14, nada nos asegura que el universo esté construido de un modo tan inflexible. No obstante, la búsqueda de esta inflexibilidad en las leyes de la naturaleza está en lo más esencial del programa de unificación en la física moderna.

Hacia finales de la década de 1980, les parecía a los físicos que, aunque la teoría de cuerdas estaba muy cerca de proporcionar una imagen única del universo, no llegaba al nivel necesario. Había dos razones para ello. En primer lugar, como se mencionó brevemente en el capítulo 7, los físicos descubrieron que en realidad

existían *cinco* versiones diferentes de la teoría de cuerdas. Recordemos que se denominan teorías del Tipo I, del Tipo IIA, del Tipo IIB, Heterótica O(32) (o Heterótica-O, para abreviar) y Heterótica $E_8 * E_8$ (Heterótica-E, para abreviar). Todas ellas comparten muchas características básicas —sus patrones vibratorios determinan la masa y las cargas de fuerza posibles; requieren un total de 10 dimensiones espaciales; sus dimensiones arrolladas deben estar en una de las formas de Calabi-Yau, etc.— y por esta razón no hemos insistido en sus diferencias a lo largo de los capítulos anteriores. Sin embargo, varios análisis realizados en la década de 1980 demostraban que son diferentes. El lector puede encontrar más detalles sobre sus propiedades en las notas finales, pero basta saber que difieren en el modo en que incorporan la supersimetría, así como en detalles significativos de los patrones vibratorios a los que sirven de base.[98] (La teoría de cuerdas del Tipo I, por ejemplo, tiene sus cuerdas abiertas, con dos extremos libres, además de los bucles cerrados en que nos hemos centrado hasta ahora). Esto ha sido un estorbo para los especialistas en teoría de cuerdas, porque, aunque es impresionante tener una propuesta seria para la teoría unificada final, tener cinco propuestas quita mucho viento a las velas de cada una de ellas.

La segunda desviación de la inevitabilidad es más sutil. Para apreciarla en toda su plenitud, debemos reconocer que todas las teorías físicas constan de dos partes. La primera parte es el conjunto de ideas fundamentales de la teoría, que habitualmente se expresan mediante ecuaciones matemáticas. La segunda parte de una teoría está formada por las soluciones de estas ecuaciones. En general, algunas ecuaciones tienen una solución y sólo una, mientras que otras tienen más de una solución (posiblemente muchas más). (Por poner un ejemplo sencillo, la ecuación «2 multiplicado por un número concreto es igual a 10» tiene una solución: 5. Pero la ecuación «cero multiplicado por un número concreto es igual a cero» tiene un número infinito de soluciones, ya que cero multiplicado por cualquier número es cero). Por lo tanto, incluso si la investigación conduce a una única teoría con unas ecuaciones únicas, podría ser que la inevitabilidad se viera comprometida porque las ecuaciones tuvieran muchas soluciones posibles diferentes. Hacia finales de la década de 1980, parecía ser éste el caso de la teoría de cuerdas. Cuando los físicos se dedicaban al estudio de cualquiera de las cinco teorías de cuerdas, descubrían que efectivamente existían muchas soluciones —por ejemplo, muchos modos posibles diferentes de arrollar las dimensiones adicionales— correspondiendo cada solución a un universo dotado de diferentes propiedades. La mayoría de esos universos, aunque surgían como soluciones válidas de las ecuaciones de la teoría de cuerdas, parecían ser irrelevantes en relación con el mundo tal como lo conocemos.

Estas desviaciones de la inevitabilidad podrían parecer unas desafortunadas características fundamentales de la teoría de cuerdas. Pero las investigaciones

realizadas desde mediados de la década de 1990 nos han dado nuevas y enormes esperanzas de que esas circunstancias puedan ser meramente reflejos del modo en que los especialistas en teoría de cuerdas han estado analizando dicha teoría. Dicho en pocas palabras, las ecuaciones de la teoría de cuerdas son tan complicadas que nadie conoce su forma exacta. Algunos físicos han conseguido tan sólo escribir versiones aproximadas de las ecuaciones. Son estas ecuaciones aproximadas las que hacen que una teoría de cuerdas difiera significativamente de otra. Y son también estas ecuaciones aproximadas las que, en el contexto de cualquiera de las cinco teorías de cuerdas, producen numerosas soluciones, un cuerno de la abundancia lleno de universos no deseados.

Desde 1995 (la fecha del comienzo de la segunda revolución de las supercuerdas), existe un conjunto cada vez mayor de pruebas de que las ecuaciones exactas, cuya forma precisa está aún fuera de nuestro alcance, pueden resolver estos problemas, contribuyendo así a dar a la teoría de cuerdas el sello de la inevitabilidad. De hecho, para la satisfacción de la mayoría de los especialistas en teoría de cuerdas, ya se ha demostrado que, cuando se conozcan las ecuaciones, exactas, éstas demostrarán que las cinco teorías de cuerdas están en realidad íntimamente relacionadas. Como los apéndices de una estrella de mar, las cinco forman parte de un ente conexo cuyas propiedades concretas están sometidas actualmente a una intensa investigación. En vez de pensar que tienen cinco teorías de cuerdas distintas, los físicos están ahora convencidos de que existe *una* teoría que aglutina a las cinco en un único marco teórico. Y al igual que la claridad surge cuando se ponen de manifiesto unas relaciones que hasta el momento se mantenían ocultas, esta unión está aportando un nuevo y poderoso punto de observación para comprender el universo según la teoría de cuerdas.

Para explicar estas ideas debemos emplear algunos de los más difíciles y revolucionarios avances que se han producido en la teoría de cuerdas. Debemos comprender la naturaleza de las aproximaciones utilizadas en el estudio de la teoría de cuerdas y las limitaciones inherentes a dichas aproximaciones. Debemos adquirir una cierta familiaridad con las astutas técnicas —llamadas en conjunto *dualidades*— que los físicos han invocado para evitar algunas de estas aproximaciones. Y entonces, debemos seguir los sutiles razonamientos que utilizan estas técnicas para hallar las ideas tan llamativas a las que hemos aludido anteriormente. Pero no hay que alarmarse. Los especialistas en teoría de cuerdas ya se han encargado de realizar el trabajo que es realmente duro y aquí nos vamos a conformar con explicar sus resultados.

No obstante, dado que hay muchas piezas aparentemente separadas que debemos desarrollar y encajar, en este capítulo es especialmente fácil que los árboles no nos dejen ver el bosque. Por lo tanto, si alguna vez a lo largo de este capítulo la discusión

se vuelve demasiado complicada y el lector se siente obligado a precipitarse hacia los agujeros negros (capítulo 13) o la cosmología (capítulo 14), se le recomienda que vuelva a echar un vistazo a la sección siguiente, que resume las ideas clave de la segunda revolución de las supercuerdas.

Un resumen de la segunda revolución de las supercuerdas

La idea primaria de la segunda revolución de las supercuerdas se sintetiza en las Figuras 12.1 y 12.2. En la Figura 12.1 vemos la situación previa a la habilidad recientemente adquirida para ir (parcialmente) más allá de los métodos de aproximación que los físicos han utilizado tradicionalmente para analizar la teoría de cuerdas.

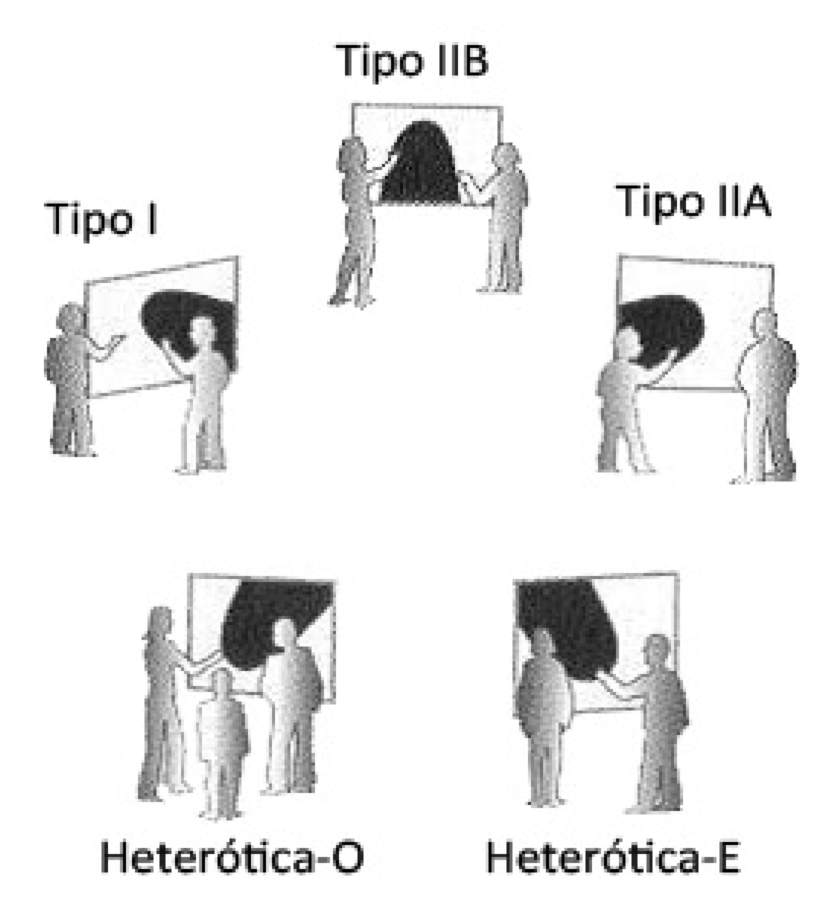


Figura 12.1 Por muchos años, los físicos que trabajaban en las cinco teorías de cuerdas pensaban que estaban trabajando en teorías completamente separadas.

Vemos que las cinco teorías de cuerdas se pensaron en un principio como teorías completamente separadas. Pero, gracias a las nuevas ideas descubiertas en investigaciones recientes, como se indica en la Figura 12.2, vemos que, como los

cinco brazos de una estrella de mar, todas las teorías de cuerdas se consideran actualmente como un marco único que lo abarca todo. (De hecho, hacia el final de este capítulo veremos que incluso habrá una sexta teoría —un sexto brazo— que se fusionará con esta unión). Este marco que lo abarca todo se ha llamado provisionalmente teoría M, por razones que se aclararán más adelante. La Figura 12.2 representa un logro señalado en la búsqueda de la teoría última.

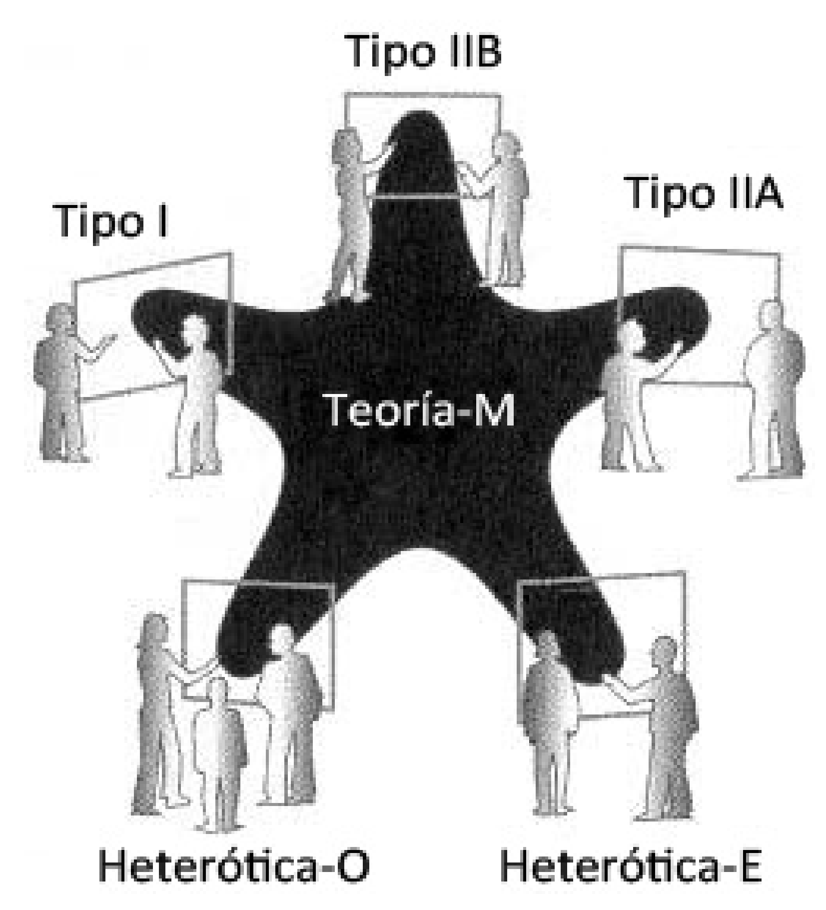


Figura 12.2 Los resultados de la segunda revolución de las supercuerdas han demostrado que las cinco teorías de cuerdas son en realidad parte de un solo marco, unificado, tentativamente llamado Teoría-M.

Algunas líneas de investigación de la teoría de cuerdas, aparentemente desconectadas unas de otras, se han tejido juntas ahora en un único tapiz —una teoría única y que lo abarca todo, que bien podría ser la teoría de todo, o TOE (theory of everything), largamente buscada—.

Aunque todavía queda mucho trabajo por hacer, hay dos características esenciales de la Teoría-M que los físicos ya han descubierto. En primer lugar la Teoría-M tiene *once* dimensiones (diez espaciales y una temporal). Más o menos del mismo modo que Kaluza descubrió que una dimensión espacial adicional permitía realizar una fusión inesperada de la relatividad general y el electromagnetismo, los especialistas en teoría de cuerdas han constatado que una dimensión espacial adicional dentro de dicha teoría —además de las nueve dimensiones espaciales y de la dimensión

temporal comentadas en capítulos anteriores— permite realizar una síntesis profundamente satisfactoria de las cinco versiones de la teoría. Además, esta dimensión espacial adicional no está tirada de los pelos; al contrario, los especialistas en teoría de cuerdas han constatado que los razonamientos de las décadas de 1970 y 1980 que conducen a las nueve dimensiones espaciales y una temporal eran *aproximados*, y que los cálculos exactos, que pueden ahora ser completados, nos muestran que una dimensión espacial ha pasado inadvertida hasta ahora.

La segunda característica que se ha descubierto con respecto a la Teoría-M es el hecho de que contiene cuerdas vibratorias, pero también incluye otros objetos: membranas vibratorias *bidimensionales*, burbujas que se ondulan *tridimensionales* (llamadas «tribranas») y además una gran cantidad de otros ingredientes diversos. Como sucede con la undécima dimensión, esta característica de la Teoría-M se pone de manifiesto cuando los cálculos se liberan de su dependencia de las aproximaciones utilizadas antes de mediados de la década de 1990.

Aparte de estas y de otras varias ideas a las que se ha llegado recientemente durante los últimos años, gran parte de la verdadera naturaleza de la Teoría-M sigue siendo un misterio —uno de los significados que se sugieren para la «M»—. Físicos de todo el mundo están trabajando con mucho ahínco para lograr comprender en su totalidad la Teoría-M, y es muy posible que esto vaya a ser el problema principal que se le plantee a la física del siglo XXI.

Un método de aproximación

Las limitaciones de los métodos que los físicos han estado utilizando para analizar la teoría de cuerdas están vinculados a algo que se llama *teoría de perturbación*. La teoría de perturbación es una denominación elaborada para hacer una aproximación que intente dar una respuesta preliminar a una pregunta, y luego mejorar sistemáticamente esta aproximación prestando una mayor atención a unos detalles más pequeños que inicialmente se ignoraban. Desempeña un papel importante en muchas áreas de la investigación científica, ha sido un elemento esencial para la comprensión de la teoría de cuerdas, y, como ahora aclararemos, es algo que encontramos frecuentemente en nuestras vidas cotidianas.

Imagine que un día su coche empieza a fallar, por lo que va usted a un mecánico para que lo revise. Después de echar un vistazo al coche, le da malas noticias. El coche precisa un nuevo motor, por lo cual las piezas y la mano de obra vienen a costar del orden de unos 900 dólares. Es una aproximación a mano alzada que usted

espera ver ajustada cuando se conozcan exactamente los detalles más concretos del trabajo que se ha de realizar. Unos pocos días más tarde, tras haber tenido el tiempo necesario para realizar pruebas adicionales al coche, el mecánico le da una estimación más exacta que asciende a 950 dólares. Le explica que también se necesita un regulador nuevo, que con piezas y costes de mano de obra tendrá un precio de 50 dólares. Finalmente, cuando usted va a recoger el coche, el mecánico ha hecho la suma detallada de todos los conceptos y le presenta una cuenta de 987,93 dólares. Según le explica, la suma incluye los 950 dólares por el motor y el regulador, y adicionalmente 27 dólares por una correa del ventilador, 10 dólares por un cable de la batería y 0,93 dólares por un cerrojo aislado. La cantidad inicial aproximada de 900 dólares se ha ajustado incluyendo más y más detalles. En términos físicos, estos detalles se denominan *perturbaciones* del estimado inicial.

Cuando la teoría de perturbación se aplica de un modo adecuado y efectivo, la estimación inicial se aproximará razonablemente a la respuesta final; una vez que se incorpora, los detalles concretos ignorados en la estimación inicial producen pequeñas diferencias en el resultado final. Sin embargo, a veces, cuando usted va a pagar una cuenta total, ésta resulta sorprendentemente diferente de la estimación inicial. Aunque se podrían utilizar otros términos más pasionales, esto se llama técnicamente un *fracaso de la teoría de perturbación*. Significa que la aproximación inicial no era una buena guía para la respuesta final porque los «refinamientos», en vez de causar unas desviaciones relativamente pequeñas, produjeron grandes cambios en la estimación grosera.

Como se indicó brevemente en capítulos anteriores, nuestra explicación de la teoría de cuerdas hasta ahora se ha basado en un planteamiento de perturbaciones, análogo en cierto modo al que ha utilizado el mecánico. La «comprensión incompleta» de la teoría de cuerdas a la que hemos aludido de vez en cuando tiene sus raíces, de un modo u otro, en este método de aproximación. Intentemos llegar a la comprensión de este importante aspecto discutiendo la teoría de perturbación en un contexto que es menos abstracto que el de la teoría de cuerdas, pero más cercano a su aplicación en la teoría de cuerdas que el ejemplo del mecánico.

Un ejemplo clásico de teoría de perturbación

Comprender el movimiento de la Tierra a través del sistema solar nos proporciona un ejemplo clásico de la utilización de un planteamiento de la teoría de perturbación. A escalas de distancia tan grandes, sólo necesitamos considerar la fuerza de la

gravedad, pero, salvo que se realicen otras aproximaciones, las ecuaciones que se hallan son extremadamente complicadas. Recuérdese que, según Newton y Einstein, cualquier objeto ejerce una influencia gravitatoria sobre cualquier otro, y esto conduce inmediatamente a una lucha gravitatoria compleja y matemáticamente intratable entre la Tierra, el Sol, la Luna, los otros planetas, y, en principio, todo el resto de los cuerpos celestes. Como nos podemos imaginar, es imposible tener en cuenta todas estas influencias y determinar el movimiento exacto de la Tierra. De hecho, aunque sólo hubiera tres participantes celestes, las ecuaciones son tan complicadas que nadie ha sido capaz de resolverlas completamente.[99]

Sin embargo, *podemos* predecir el movimiento de la Tierra a través del sistema solar con gran exactitud haciendo uso de un planteamiento de la teoría de las perturbaciones. La enorme masa del Sol, en comparación con la de cualquier otro miembro de nuestro sistema solar, y su proximidad a la Tierra, en comparación con la distancia a cualquier otra estrella, hace que ésta sea, con diferencia, la influencia dominante sobre el movimiento de la Tierra. Por ello, podemos conseguir una estimación grosera teniendo en cuenta sólo la influencia gravitatoria del Sol. En muchos casos esta aproximación se adecua perfectamente a los objetivos. Si es necesario, podemos refinar esta aproximación incluyendo sucesivamente los efectos gravitatorios de los cuerpos que, en una serie ordenada a partir del Sol, producen mayores efectos, como es el caso de la Luna y de aquellos planetas que se encuentren más próximos en el momento considerado. Los cálculos pueden empezar a hacerse difíciles a medida que el tejido de influencias gravitatorias que se va formando llega a complicarse, pero no vamos a dejar que esto oscurezca la filosofía de la teoría de perturbación: la interacción gravitatoria Sol-Tierra nos da una explicación aproximada del movimiento de la Tierra, mientras que el resto del complejo que forman otras influencias gravitatorias nos ofrece una sucesión de refinamientos cada vez menores.

Un método perturbativo funcionaría en este ejemplo porque hay una influencia física dominante que admite una descripción teórica relativamente sencilla. Pero, no siempre es así. Por ejemplo, si nos interesa el movimiento de tres estrellas de masas parecidas que describen órbitas una alrededor de la otra en un sistema trinario, no hay una relación gravitatoria cuya influencia empequeñezca la de las otras. De igual manera, no hay una interacción dominante que proporcione una estimación grosera, mientras los demás efectos causan sólo pequeños refinamientos. Si intentamos utilizar un método perturbativo, por ejemplo separando la atracción gravitatoria existente entre dos estrellas y utilizándola para determinar nuestra aproximación, veríamos rápidamente que nuestro método ha fallado. Los cálculos nos revelarían que el «refinamiento» del movimiento que se deriva de la inclusión de la tercera estrella *no es* pequeño, sino que, de hecho, es tan significativo como la supuesta

aproximación que habíamos realizado inicialmente. Esto no es extraño: el movimiento de tres personas bailando la jota tiene poca semejanza con el de dos personas que bailan un tango. Un gran ajuste significa que la aproximación inicial estaba muy lejos de ser correcta y que todo el esquema estaba construido sobre un castillo de naipes. Debemos darnos cuenta de que no se trata sólo de incluir el gran ajuste debido a la influencia de la tercera estrella. Lo que se produce es un efecto dominó: el gran ajuste produce un impacto significativo en el movimiento de las otras dos estrellas, el cual a su vez produce un gran impacto en el movimiento de la tercera estrella, que a continuación produce un impacto sustancial en las otras dos, y así sucesivamente. Todos los hilos del tejido gravitatorio son igualmente importantes y han de ser considerados simultáneamente. A menudo, en estos casos, nuestro único recurso es utilizar la fuerza bruta de los ordenadores para simular el movimiento resultante.

Este ejemplo explica la importancia que tiene, cuando se utiliza un método perturbativo, el determinar si la estimación supuestamente aproximada es realmente aproximada, y si lo es, cuáles y cuántos son los detalles menores que deben incluirse con el fin de conseguir el nivel de precisión que se desea. Como veremos ahora, estas cuestiones son especialmente decisivas para la aplicación de instrumentos de la teoría de perturbación a los procesos físicos del microuniverso.

Una aproximación perturbativa a la teoría de cuerdas

Los procesos físicos dentro de la teoría de cuerdas se forman a partir de las interacciones básicas entre cuerdas vibradoras. Como decíamos hacia el final del capítulo 6*, estas interacciones incluyen la escisión y la posterior unión de los bucles de las cuerdas, como se ve en la Figura 6.7, que reproducimos en la Figura 12.3, para mayor comodidad.

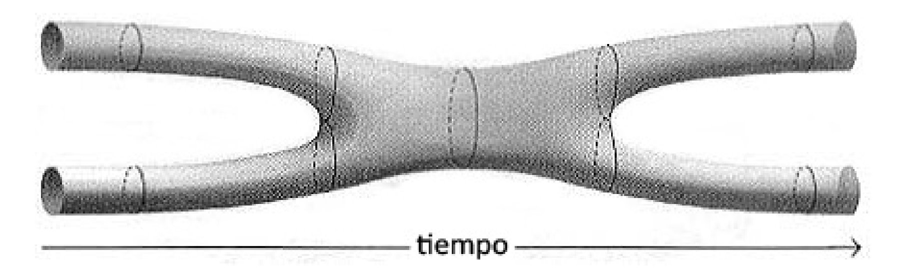


Figura 12.3 Las cuerdas interactúan uniéndose y escindiéndose.

*A los lectores que no hayan leído la sección del capítulo 6 titulada «Una

respuesta más precisa» les puede resultar de ayuda echar una ojeada ahora a la parte inicial de dicha sección.

Los expertos en teoría de cuerdas han demostrado cómo se puede asociar una fórmula matemática precisa con el dibujo esquemático de la Figura 12.3, una fórmula que expresa la influencia que ejerce cada cuerda recién llegada en el movimiento resultante de la otra. (Ciertos detalles de la fórmula son diferentes en las cinco teorías de cuerdas, pero por ahora ignoraremos esos aspectos sutiles). Si no fuera por la mecánica cuántica, con esta fórmula se acabaría la historia de cómo interaccionan las cuerdas. Pero el frenesí microscópico impuesto por el principio de incertidumbre implica que los pares cuerda/anticuerda (dos cuerdas que ejecutan patrones vibratorios opuestos) pueden aparecer de repente y de un momento a otro, tomando energía prestada del universo, mientras se aniquilan uno a otro con suficiente prisa, saldando así el préstamo de energía. Estos pares de cuerdas, que aunque nacen del frenesí cuántico viven de energía prestada y por consiguiente deben recombinarse pronto para formar un solo bucle, se conocen como *pares de cuerdas virtuales*. Además, aunque esto sólo es algo momentáneo, la presencia pasajera de estos pares adicionales de cuerdas virtuales afecta a las propiedades concretas de la interacción.

Esto se representa esquemáticamente en la Figura 12.4. Las dos cuerdas iniciales se empalman en el punto (a), donde se funden en un único bucle. Este bucle se desplaza una corta distancia, pero en (b) las fluctuaciones cuánticas frenéticas ocasionan un par de cuerdas virtuales que se desplaza un corto trecho y luego queda aniquilado en (c), produciendo, de nuevo, una sola cuerda. Finalmente, en (d), esta cuerda se desprende de su energía disociándose en un par de cuerdas que avanzan en nuevas direcciones. Debido a la existencia de un único bucle en el centro de la Figura 12.4, los físicos llaman a esto un proceso de «bucle único». Al igual que sucedía con la interacción descrita en la Figura 12.3, se puede asociar a este diagrama una fórmula matemática exacta para resumir el efecto que produce el par de cuerdas virtuales en el movimiento de las dos cuerdas originales.

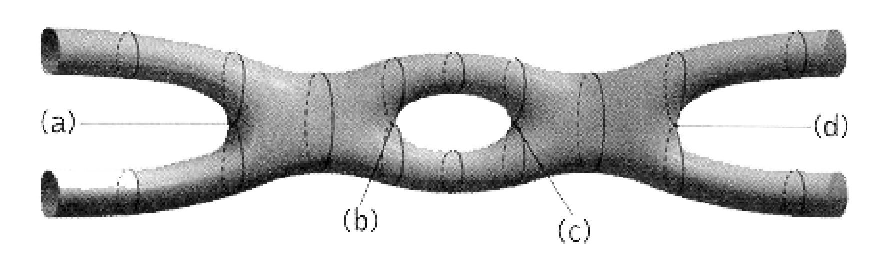


Figura 12.4 El frenesí cuántico puede causar la erupción de un par de cuerda/anticuerda (b) y aniquilarlo (c), produciendo una interacción más complicada.

Pero tampoco aquí termina la historia, ya que los temblores cuánticos pueden hacer que se produzcan unas erupciones momentáneas de las cuerdas virtuales un número cualquiera de veces, produciéndose así una sucesión de pares de cuerdas

virtuales. Esto da lugar a unos diagramas que tienen más y más bucles, como se ilustra en la Figura 12.5. Cada de uno de estos diagramas proporciona una manera práctica y sencilla de representar los procesos físicos que tienen lugar: las cuerdas que llegan se fusionan, los temblores cuánticos hacen que el bucle resultante se escinda en un par de cuerdas virtuales, estas siguen adelante y luego se aniquilan mutuamente mezclándose en un solo bucle que sigue adelante y produce otro par de cuerdas virtuales, y sigue y sigue. Como sucede con los otros diagramas, para cada uno de estos procesos existe una correspondiente fórmula matemática que resume el efecto producido en el movimiento del par de cuerdas original.[100]

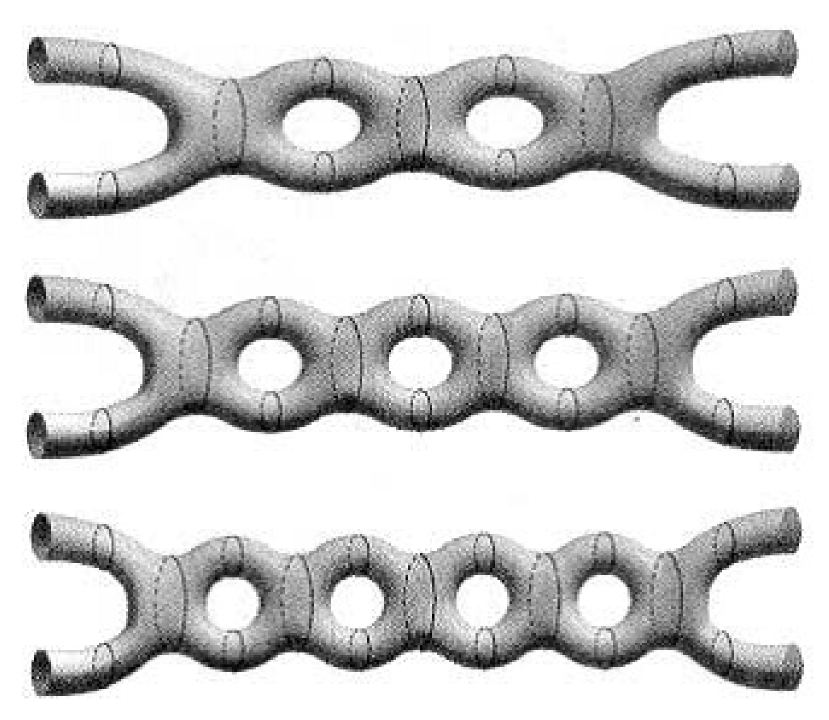


Figura 12.5 El frenesí cuántico puede causar la erupción y aniquilación de numerosas secuencias de pares cuerda/anticuerda.

Además, del mismo modo que el mecánico determina el importe final de la factura por la reparación del automóvil con un refinamiento de su estimación original de 900 dólares, a los que añade 50 dólares, 27 dólares, 10 dólares y 0,93 dólares, y del mismo modo que avanzamos hacia una comprensión cada vez más precisa del movimiento de la Tierra mediante un refinamiento de la influencia del Sol, al que añadimos los efectos menores de la Luna y otros planetas, también los especialistas en teoría de cuerdas han demostrado que podemos entender la interacción entre dos cuerdas uniendo en una suma las expresiones matemáticas de los diagramas sin bucles (sin pares de cuerdas virtuales), de un bucle (un par de cuerdas virtuales), de dos bucles (dos pares de cuerdas virtuales), y así sucesivamente, como se ilustra en la Figura 12.6.

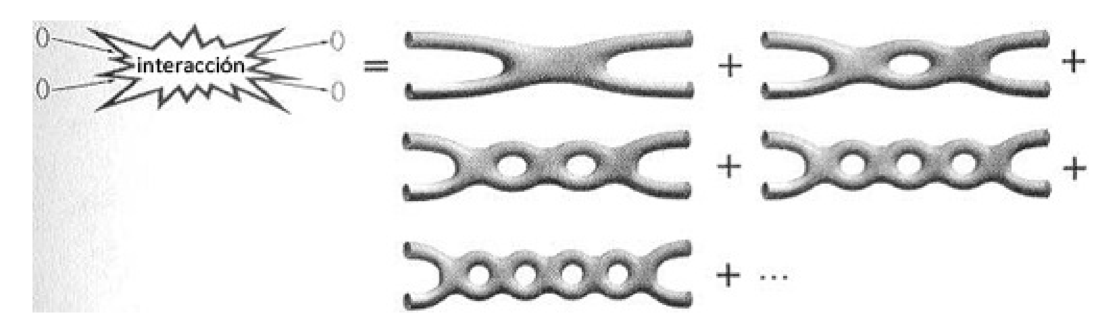


Figura 12.6 La influencia neta que cada cuerda que ingresa tiene sobre las otras viene a sumar todas las influencias que invloucran diagramas con aún más bucles.

Para realizar un cálculo exacto es necesario unir en una suma las expresiones matemáticas asociadas a cada uno de estos diagramas que tienen un número cada vez mayor de bucles. No obstante, dado que la cantidad de diagramas es infinita y los cálculos matemáticos asociados a cada uno se hacen cada vez más difíciles a medida que aumenta el número de bucles, la tarea que se plantea es imposible. En vez de esto, los especialistas en teoría de cuerdas han trasladado estos cálculos a un marco perturbativo, basándose en la expectativa de que los procesos carentes de bucles dan una estimación aproximada razonable, y los diagramas con bucles producen unos ajustes que resultan más pequeños a medida que aumenta el número de bucles.

De hecho, casi todo lo que sabemos sobre la teoría de cuerdas —incluida una gran parte del material tratado en los capítulos anteriores— lo descubrieron físicos que realizaban unos cálculos minuciosos y elaborados en los que utilizaban este planteamiento perturbativo. Pero, para fiarnos de la exactitud de los resultados hallados, debemos determinar si entran realmente en ese margen de aproximación las supuestas estimaciones aproximadas que ignoran todo salvo unos pocos de los primeros diagramas de la Figura 12.6. Esto nos lleva a planteamos la pregunta crucial: ¿estamos dentro de ese margen de aproximación?

¿Está la estimación dentro del margen de estimación?

Depende. Aunque la fórmula matemática asociada con cada diagrama se va haciendo muy complicada a medida que crece el número de bucles, los expertos en teoría de cuerdas han reconocido una característica básica y esencial. De un modo parecido al hecho de que la resistencia de una cuerda corriente determina la probabilidad de que el tirar y sacudir vigorosamente haga que se desgarre en dos trozos, también aquí existe un número que determina la probabilidad de que las fluctuaciones cuánticas hagan que una cuerda se escinda en dos cuerdas, produciendo de un momento a otro un par virtual. Este número se conoce como *constante de acoplamiento* de las cuerdas

(más exactamente, cada una de las cinco teorías de cuerdas tiene su propia constante de acoplamiento de las cuerdas, como explicaremos en breve). Este nombre es bastante descriptivo: la magnitud del valor de la constante de acoplamiento de cuerdas indica lo estrechamente que están relacionados los temblores cuánticos de tres cuerdas (el bucle inicial y los dos bucles virtuales en que se escinde) —por decirlo así, lo fuertemente que están *acopladas* una con otra—. Las fórmulas de cálculo muestran que cuanto mayor sea la constante de acoplamiento de cuerdas, mayor es la probabilidad de que los temblores cuánticos hagan que una cuerda inicial se escinda (y posteriormente vuelva a unirse); cuanto más pequeña sea la constante de acoplamiento de las cuerdas, menor será la probabilidad de que aparezcan de un momento a otro las cuerdas virtuales.

Trataremos brevemente la cuestión de determinar el valor de la constante de acoplamiento dentro de cualquiera de las cinco teorías de cuerdas, pero, en primer lugar, ¿qué estamos expresando realmente cuando decimos «pequeño» o «grande» en relación con la magnitud de dicha constante? Veamos. Las matemáticas en que se basa la teoría de cuerdas muestran que la línea divisoria entre «pequeño» y «grande» es el número 1, en el sentido que explicamos a continuación. Si la constante de acoplamiento de cuerdas tiene un valor menor que 1, entonces —como si se produjeran múltiples huelgas salvajes— para un gran número de pares de cuerdas virtuales se vuelve cada vez más *improbable* que puedan aparecer de un momento a otro. Sin embargo, si la constante de acoplamiento es 1 o mayor que 1, es cada vez más *probable* que unas cantidades cada vez más grandes de pares virtuales irrumpan repentinamente en el escenario.[101] El resultado es que, si la constante de acoplamiento de cuerdas es menor que 1, la cantidad de diagramas de bucles se hace cada vez menor a medida que aumenta el número de bucles de los diagramas. Esto es justo lo que se necesita para establecer el marco perturbativo, ya que indica que obtendremos unos resultados razonablemente precisos, incluso en el caso de que ignoremos todos los procesos, excepto los que sólo presentan unos pocos bucles. Sin embargo, si la constante de acoplamiento de cuerdas no es menor que 1, la cantidad de diagramas de bucles se hace más importante a medida que aumenta el número de bucles de los diagramas. Como en el caso de un sistema trinario de estrellas, esto invalida cualquier planteamiento dentro de la teoría de perturbación. La supuesta estimación aproximada —el proceso sin bucles— *no es* una aproximación. (Esta explicación es igualmente aplicable a cualquiera de las cinco teorías de cuerdas, cumpliéndose que el valor de la constante de acoplamiento de cuerdas determina en cualquier teoría la eficacia del esquema de aproximación basado en la teoría de perturbación).

Esta constatación nos conduce a la siguiente pregunta crucial: ¿cuál es el valor de la constante de acoplamiento de cuerdas (o, más exactamente, cuáles son los valores

de las constantes de acoplamiento en cada una de la cinco teorías de cuerdas)? *Por ahora, nadie ha sido capaz de responder a esta pregunta*. Es uno de los temas más importantes que siguen sin resolverse en la teoría de cuerdas. Podemos estar seguros de que las conclusiones basadas en un marco perturbativo están justificadas sólo si la constante de acoplamiento de cuerdas es menor que 1. Además, el valor exacto de la constante de acoplamiento de cuerdas produce un impacto directo en las masas y cargas transportadas por los diversos patrones vibratorios de las cuerdas. Por lo tanto, vemos que muchas propiedades físicas dependen del valor de la constante de acoplamiento de cuerdas. En consecuencia, vamos a estudiar más de cerca por qué la importante pregunta relativa a su valor —en cualquiera de las cinco teorías de cuerdas— sigue sin respuesta.

Las ecuaciones de la teoría de cuerdas

El planteamiento perturbativo para determinar cómo interaccionan las cuerdas entre sí también se puede utilizar para determinar las ecuaciones fundamentales de la teoría de cuerdas. En esencia, las ecuaciones de la teoría de cuerdas determinan cómo interaccionan las cuerdas y, a la inversa, el modo en que interaccionan las cuerdas determina directamente las ecuaciones de la teoría.

Como ejemplo principal, en cada una de las cinco teorías de cuerdas hay una ecuación que sirve para determinar el valor de la constante de acoplamiento. Sin embargo, por ahora, los físicos sólo han podido hallar una aproximación de esta ecuación en cada una de las cinco teorías de cuerdas, evaluando matemáticamente un pequeño número de diagramas importantes mediante un planteamiento perturbativo. He aquí lo que dicen las ecuaciones aproximadas: en cualquiera de las cinco teorías de cuerdas, la constante de acoplamiento toma un valor tal que, si se multiplica por cero, el resultado es cero. Ésta es una ecuación terriblemente decepcionante; puesto que cualquier número multiplicado por cero da cero, la ecuación se puede resolver con cualquier valor de la constante de acoplamiento de cuerdas. Por lo tanto, en cualquiera de las cinco teorías de cuerdas, la ecuación aproximada para obtener su constante de acoplamiento no nos da ninguna información sobre su valor.

A propósito de esto, diremos que en cada una de las cinco teorías de cuerdas hay otra ecuación que supuestamente determina la forma exacta de las dimensiones del espacio-tiempo, tanto de las dimensiones extendidas, como de las arrolladas. La versión aproximada de esta ecuación que tenemos actualmente es mucho más restrictiva que la que se refiere a la constante de acoplamiento de cuerdas, pero

también admite muchas soluciones. Por ejemplo, cuatro dimensiones extendidas del espacio-tiempo, junto con cualquier espacio arrollado de seis dimensiones de Calabi-Yau, proporciona todo un conjunto de soluciones, pero incluso así esto no agota todas las posibilidades, que también permiten una distribución diferente del número de dimensiones extendidas y arrolladas.[102]

¿Qué podemos hacer con estos resultados? Hay tres posibilidades. La primera, comenzando por la posibilidad más pesimista, es que, aunque cada teoría de cuerdas viene equipada con ecuaciones para determinar el valor de su constante de acoplamiento, así como la dimensionalidad y la forma geométrica precisa del espacio-tiempo —algo de lo que no puede presumir ninguna otra teoría—, incluso la forma exacta, hasta ahora desconocida, de estas ecuaciones puede admitir un vasto espectro de soluciones, debilitándose así sustancialmente el poder de predicción de dichas ecuaciones. Si fuera cierto, esto supondría un contratiempo, ya que lo que promete la teoría de cuerdas es que será capaz de *explicar* estas características del cosmos, en vez de exigirnos que las determinemos a partir de la observación experimental, para luego, más o menos arbitrariamente, insertarlas en la teoría. Volveremos a esta posibilidad en el capítulo 15. La segunda posibilidad es que la no deseada flexibilidad en las ecuaciones aproximadas de cuerdas puede ser una indicación de un defecto sutil de nuestro razonamiento. Estamos intentando utilizar un planteamiento perturbativo para determinar el valor de la propia constante de acoplamiento de cuerdas. Pero, como ya se dijo, los métodos perturbativos son coherentes sólo si la constante de acoplamiento es menor que 1, por lo que nuestro cálculo puede estar haciendo una suposición injustificada sobre su propia respuesta, concretamente, que el resultado tenga que ser menor que 1. Nuestro fracaso podría indicar que esta suposición es errónea y que, quizá, la constante de acoplamiento en cualquiera de las cinco teorías de cuerdas es mayor que 1. La tercera posibilidad es que esa no deseada flexibilidad podría ser debida meramente al hecho de utilizar ecuaciones aproximadas en vez de ecuaciones exactas. Por ejemplo, aunque la constante de acoplamiento en una teoría de cuerdas determinada podría ser menor que 1, las ecuaciones de la teoría pueden, no obstante, depender en gran medida de las aportaciones de *todos* los diagramas. Es decir, los pequeños reajustes acumulados procedentes de unos diagramas que tienen cada vez más bucles podrían ser esenciales para modificar las ecuaciones aproximadas —que admiten muchas soluciones— convirtiéndolas en ecuaciones exactas que serían mucho más restrictivas.

A principios de la década de 1990, las dos últimas posibilidades hicieron que la mayoría de los especialistas en teoría de cuerdas tuvieran clara la idea de que la fiabilidad completa del marco de la teoría de perturbación estaba definitivamente en vías de progresar. La mayoría de estos especialistas coincidían en que el avance siguiente requeriría un método *no perturbativo* —un método que no dependiera de

técnicas de cálculo aproximado y, por consiguiente, pudiera ir mucho más allá de las limitaciones establecidas por el marco perturbativo—. En 1994, el hallazgo de tales métodos parecía algo así como hacer castillos en el aire. Sin embargo, hay ocasiones en que esos castillos se hacen realidad.

Dualidad

Cientos de especialistas en teoría de cuerdas de todo el mundo se reúnen anualmente en un congreso dedicado a resumir los resultados del último año y a valorar las cualidades relativas de las distintas direcciones posibles para la investigación. Dependiendo de los avances conseguidos durante un determinado año, se puede predecir el nivel de interés y de expectación de los participantes. A mediados de la década de 1980, el momento de auge de la primera revolución de las supercuerdas, las reuniones rebosaban de euforia incontenida. En general, los físicos esperaban que pronto llegarían a comprender la teoría de cuerdas en su totalidad y que podrían declararla como la teoría definitiva del universo. Visto retrospectivamente, esto era una ingenuidad. Durante los años posteriores se ha demostrado que la teoría de cuerdas tiene muchos aspectos profundos y sutiles que necesitarán indudablemente grandes esfuerzos de dedicación durante largo tiempo para ser comprendidos. Aquellas primeras expectativas, nada realistas, desembocaron en un retroceso; cuando se vio que las cosas no encajaban inmediatamente en su sitio, muchos investigadores se quedaron alicaídos. Los congresos sobre cuerdas de finales de la década de 1980 reflejaban una desilusión debida a los bajos niveles alcanzados; algunos físicos presentaban resultados interesantes, pero la atmósfera reflejaba una carencia de inspiración. Algunos incluso sugirieron que se dejara de celebrar un congreso anual sobre teoría de cuerdas. Pero las cosas empezaron a mejorar a principios de la década de 1990. Después de varios avances, algunos de los cuales hemos comentado en capítulos anteriores, la teoría de cuerdas comenzó a recuperar el ímpetu y los investigadores volvieron a mostrar expectación y optimismo. Pero pocos indicios presagiaban lo que iba a suceder en el congreso sobre teoría de cuerdas de marzo de 1995 en la Universidad del Sur de California.

Cuando llegó la hora convenida para que tomase la palabra, Edward Witten subió con grandes zancadas al estrado y pronunció una conferencia que fue el detonante para la segunda revolución de las supercuerdas. Inspirándose en trabajos anteriores de Duff, Hull, Townsend, y avanzando sobre los conceptos de Schwarz, del físico indio Ashoke Sen, y otros, Witten anunció una estrategia para lograr la explicación de la

teoría de cuerdas a través de la teoría de perturbación. Una parte central de ese plan incluía el concepto de *dualidad*.

Los físicos utilizan el término dualidad para describir modelos teóricos que parecen ser diferentes pero, sin embargo, se puede demostrar que dan exactamente las mismas propiedades físicas. Existen ejemplos «triviales» de dualidades en las que teorías ostensiblemente diferentes son en realidad idénticas y sólo parecen ser diferentes debido al modo en que se presentan. Para alguien que sólo sepa inglés, la relatividad general podría no ser inmediatamente reconocible como la teoría de Einstein si fuera presentada en chino. Sin embargo, un físico que dominara con fluidez ambas lenguas podría realizar fácilmente una traducción de la una a la otra, demostrando así su equivalencia. Llamamos a este ejemplo «trivial», porque no se gana nada, desde el punto de vista de la física, mediante esta traducción. Si alguien que domina con fluidez el inglés y el chino estuviera estudiando un problema difícil de la relatividad general, el problema sería igual de emocionante independientemente de la lengua utilizada para expresarlo. Un cambio del inglés al chino, o viceversa, no aporta nuevas ideas a la física.

Ejemplos no triviales de dualidad son aquellos en los que distintas descripciones de la misma situación física *producen* ideas físicas y métodos matemáticos de análisis diferentes y complementarios. De hecho, ya nos hemos encontrado con dos ejemplos de dualidad. En el capítulo 10 comentábamos cómo, según la teoría de cuerdas, un universo que tiene una dimensión circular de radio *R* puede ser descrito igualmente como un universo con una dimensión circular de radio 1/R. Se trata de situaciones geométricas distintas que, por las propiedades de la teoría de cuerdas son en realidad idénticas físicamente. Un segundo ejemplo es la simetría especular. Aquí, dos formas de Calabi-Yau diferentes con seis dimensiones espaciales adicionales —universos que a primera vista parecerían completamente distintos— dan exactamente las mismas propiedades físicas. Proporcionan descripciones duales de un mismo universo. A diferencia del caso del inglés y el chino, *hay* ideas físicas muy importantes que se deducen de la utilización de estas descripciones duales, tales como un mínimo tamaño para las dimensiones circulares y procesos de cambio de la topología dentro de la teoría de cuerdas.

En su conferencia del congreso sobre cuerdas de 1995, Witten dio pruebas de un nuevo tipo de dualidad con un carácter muy profundo. Como se esbozó brevemente al principio de este capítulo, Witten sugirió que las cinco teorías de cuerdas, aunque aparentemente diferentes en su estructura básica, no son todas ellas sino modos distintos de describir las mismas propiedades físicas subyacentes. Así pues, en vez de tener cinco teorías de cuerdas diferentes, tendríamos sencillamente cinco ventanas diferentes desde las que asomarnos a un único marco teórico subyacente.

Antes de producirse los avances de mediados de la década de 1990, la posibilidad

de obtener una gran versión de la dualidad, como esta de Witten, era uno de esos proyectos ilusionantes que los físicos querrían llevar a puerto, pero sobre los cuales rara vez se habla, ya que parecen demasiado extravagantes. Si dos teorías de cuerdas difieren con respecto a detalles significativos de su estructura, es difícil imaginarse cómo podrían ser meramente descripciones distintas de las mismas propiedades físicas subyacentes. No obstante, debido al poder sutil de la teoría de cuerdas, existen pruebas cada vez más evidentes de que las cinco teorías de cuerdas *son* duales. Además, como veremos más adelante, Witten aportó pruebas de que incluso una sexta teoría podría estar mezclada en el estofado.

Estos aspectos están íntimamente entrelazados con los temas relativos a la aplicabilidad de los métodos perturbativos que mencionamos al final de la sección anterior. La razón es que las cinco teorías de cuerdas son manifiestamente diferentes cuando cada una de ellas está *débilmente acoplada* —una expresión de los iniciados que significa que la constante de acoplamiento de cuerdas es menor que 1—. Debido a su confianza en los métodos perturbativos, los físicos han sido incapaces durante cierto tiempo de plantear la pregunta acerca de cuáles son las propiedades que tendría cualquiera de las teorías de cuerdas si su constante de acoplamiento fuera mayor que 1: el llamado comportamiento *fuertemente acoplado*. La afirmación de Witten y otros, a la que nos referimos ahora, es que esta pregunta crucial se puede responder actualmente. Sus resultados sugieren de una forma convincente que, junto con una sexta teoría que tenemos que describir aún, el comportamiento de acoplamiento fuerte de cualquiera de estas teorías tiene una descripción dual en términos de comportamiento de acoplamiento débil de otra teoría, y viceversa.

Para dar un sentido más tangible a lo que esto significa, podría ser conveniente pensar en la siguiente analogía. Imaginemos dos individuos que han vivido bastante aislados. A uno de ellos le encanta el hielo pero, curiosamente, nunca ha visto el agua (en su forma líquida). Al otro le encanta el agua pero, lo que tampoco deja de ser curioso, nunca ha visto hielo. En un encuentro casual, ambos deciden hacer juntos una excursión al desierto, con acampada incluida. Cuando emprenden el viaje, cada uno de ellos está fascinado por lo que el otro lleva en el equipo. El aficionado al hielo está cautivado por el líquido transparente, homogéneo y suave que lleva el aficionado al agua, y a éste le fascinan de un forma extraña los curiosos cubos sólidos y cristalinos que lleva el aficionado al hielo. Ninguno de ellos tiene la menor idea de que pueda existir en realidad una estrecha relación entre el agua y el hielo; para ellos se trata de dos sustancias completamente diferentes. Pero a medida que se adentran en el calor abrasador del desierto, se sorprenden al ver que el hielo empieza lentamente a convertirse en agua. Después, en el frío helador de la noche del desierto, se sorprenden igualmente al observar que el agua líquida comienza poco a poco a convertirse en hielo sólido. Entonces llegan a la conclusión de que las dos sustancias

—que inicialmente consideraban totalmente independientes— están estrechamente relacionadas.

La dualidad de las cinco teorías de cuerdas es algo similar: dicho en pocas palabras, las constantes de acoplamiento de cuerdas desempeñan un papel análogo al de la temperatura en nuestra analogía del desierto. Como el hielo y el agua, cualquier par de teorías, elegidas entre las cinco teorías de cuerdas, parece a primera vista un par de teorías completamente distintas. Sin embargo, cuando hacemos que varíen los valores de sus respectivas constantes de acoplamiento, las teorías transmutan entre ellas mismas. Del mismo modo que el hielo transmuta en agua cuando hacemos subir su temperatura, una teoría de cuerdas puede transmutar en otra cuando aumentamos el valor de su constante de acoplamiento. Esto nos lleva a un largo camino hacia la demostración de que todas las teorías de cuerdas son descripciones duales de una única estructura subyacente, que sería la análoga al H_2O para el agua y el hielo.

El razonamiento que subyace a estos resultados se basa casi por completo en la utilización de argumentos enraizados en principios de simetría. Veamos esto más detalladamente.

El poder de la Simetría

A lo largo de los años, nadie intentó ni siquiera estudiar las propiedades de alguna de las cinco teorías de cuerdas para valores grandes de sus constantes de acoplamiento, porque nadie tenía ni idea de cómo proceder sin utilizar el marco perturbativo. Sin embargo, a finales de la década de 1980 y principios de la de 1990, algunos físicos realizaron progresos lentos, pero constantes, en la identificación de ciertas propiedades especiales —incluidas ciertas masas y cargas de fuerza— que son parte de la física del acoplamiento fuerte de una teoría de cuerdas determinada y que están dentro de nuestra capacidad actual para realizar cálculos. El cálculo relativo a dichas propiedades, que necesariamente transciende el marco perturbativo, ha desempeñado un papel fundamental para dirigir el progreso de la segunda revolución de las supercuerdas y está firmemente enraizado en el poder de la simetría.

Los principios de simetría proporcionan unas herramientas muy perspicaces para llegar a la comprensión de una gran cantidad de aspectos del mundo físico. Ya hemos comentado, por ejemplo, que la ampliamente arraigada creencia de que las leyes de la física no se refieren especialmente a un determinado lugar del universo o un momento específico en el tiempo nos permite argumentar que las leyes que gobiernan el aquí y el ahora son las mismas que funcionan en todo lugar y en todo momento.

Éste es un ejemplo grandioso, pero los principios de simetría pueden ser igualmente importantes en circunstancias no tan universales. Por ejemplo, si usted es testigo de un crimen, pero sólo ha sido capaz de vislumbrar el lado derecho de la cara del criminal, un dibujante de la policía puede, no obstante, utilizar la información que usted le da para esbozar la cara completa. La razón de esto es la simetría. Aunque existen diferencias entre el lado derecho y el izquierdo de la cara de una persona, la mayoría de los rasgos son lo suficientemente simétricos como para que la imagen de un solo lado pueda ser proyectada en espejo para conseguir una buena aproximación del otro lado.

En cada una de estas aplicaciones tan diferentes, el poder de la simetría consiste en posibilitar el establecimiento de propiedades de una manera *indirecta* —algo que a menudo resulta mucho más fácil que otros métodos más directos—. Podríamos enterarnos de cómo son las propiedades físicas fundamentales en la galaxia de Andrómeda trasladándonos allí, hallando un planeta que gire alrededor de alguna estrella, construyendo aceleradores de partículas y realizando el tipo de experimentos que se llevan a cabo en la Tierra. Sin embargo, el método indirecto de aplicar la simetría con cambios de escenario es mucho más fácil. También podríamos enteramos de cómo son los rasgos del lado izquierdo de la cara del criminal capturándolo y examinándolo. Pero, a menudo es mucho más fácil utilizar la simetría izquierda-derecha que tienen los rostros humanos.[103]

La supersimetría es un principio de simetría más abstracto que relaciona las propiedades físicas de los constituyentes elementales que tienen números de espín diferentes. En el mejor de los casos, sólo existen indicios procedentes de resultados experimentales que sugieren que el microuniverso cuenta con esta simetría, pero, por razones que hemos explicado anteriormente, hay una fuerte creencia en que esto es así. Ciertamente, esto constituye una parte integrante de la teoría de cuerdas. En la década de 1990, siguiendo la obra pionera de Nathan Seiberg del Instituto de Estudios Avanzados, los físicos habían constatado que la supersimetría proporciona un instrumento agudo e incisivo, capaz de dar respuesta a algunas preguntas muy difíciles e importantes por medios indirectos.

Incluso sin entender detalles intrincados de una teoría, el hecho de que ésta lleve incorporada una simetría nos permite restringir significativamente las propiedades que puede tener. Utilizando una analogía lingüística, supongamos que nos dicen que una secuencia de letras se ha escrito en una tira de papel, que en la secuencia aparece exactamente tres veces una letra determinada, por ejemplo la «y», y que el papel se ha escondido dentro de un sobre sellado. Si no se nos da más información, no hay manera de que podamos adivinar la secuencia —todo lo que sabemos es que podría haber una mezcla aleatoria de letras con tres «yes» como, por ejemplo, *mvcfojziyxidqfqzyycdi* o cualquier otra entre las infinitas posibilidades. Pero

supongamos que posteriormente nos dan dos pistas más: la secuencia de letras escondida forma una palabra inglesa y tiene el mínimo número de letras coherente con la primera pista que nos hablaba de tres «yes». Del infinito número de secuencias de letras que se puede producir, estas claves reducen las posibilidades a *una* palabra inglesa —a la más corta que contiene tres «yes»: syzygy—.

La supersimetría aporta unas premisas restrictivas similares para aquellas teorías en las que los principios de simetría están incluidos. Para hacernos una idea de ello, supongamos que nos presentan un enigma físico análogo al enigma lingüístico que acabamos de explicar. Dentro de una caja hay algo escondido —su identidad no se especifica— que tiene una cierta carga de fuerza. La carga puede ser eléctrica, magnética o de cualquier otro tipo, pero, para concretar, digamos que tiene tres unidades de carga eléctrica. Sin más información, no se puede determinar la identidad del contenido. Podrían ser tres partículas de carga 1, como los positrones o los protones: podrían ser cuatro partículas de carga 1 y una partícula de carga –1 (como el electrón), ya que esta combinación también da como resultado una carga neta de tres unidades: podrían ser nueve partículas de carga un tercio (como el up-quark) o podrían ser esas mismas nueve partículas acompañadas de cualquier número de partículas sin carga (como los fotones). Como en el caso de la secuencia escondida de letras cuando sólo teníamos la pista relativa a las tres «yes», las posibilidades del contenido de la caja son infinitas.

Pero, supongamos ahora que, como en el caso del enigma lingüístico, nos dan dos pistas más: la teoría que describe el universo —y, por lo tanto, el contenido de la caja — es supersimétrica, y el contenido de la caja tiene la *masa mínima* coherente con la primera pista, según la cual hay tres unidades de carga. Basándose en las teorías de Eugene Bogomolni, Manoj Prasad y Charles Sommerfeld, los físicos han demostrado que esta especificación de un marco organizativo restringido (el marco de la supersimetría, que es análogo a limitarse a la lengua inglesa) y una «restricción mínima» (la masa mínima para una cantidad dada de carga eléctrica, que sería una condición análoga a una mínima longitud de la palabra con un número dado de «yes») implica que la identidad del contenido oculto está determinada *de forma única*. Es decir, sencillamente asegurando que el contenido de la caja es el más ligero posible, pero con una carga determinada, los físicos demostraron que la identidad de dicho contenido era plenamente conocida. Los constituyentes de masa mínima para un valor prefijado de carga se conocen como *estados BPS*, en honor a sus tres descubridores.[104]

Lo importante en relación con los estados BPS es que sus propiedades se determinan de manera única, fácil y exacta, sin tener que recurrir a un cálculo perturbativo. Esto es cierto independientemente del valor de las constantes de acoplamiento. Es decir, incluso si la constante de acoplamiento es grande, lo cual

implica que el método de las perturbaciones no es válido, podemos, no obstante, deducir las propiedades exactas de las configuraciones BPS. Las propiedades se suelen llamar masas y cargas *no perturbativas*, ya que sus valores trascienden el esquema de aproximación perturbativo. Por esta razón, se puede también pensar que las siglas BPS significan «beyond perturbative states» (más allá de los estados perturbativos).

Las propiedades BPS constituyen sólo una pequeña parte de la totalidad de las propiedades físicas de una teoría de cuerdas determinada cuando su constante de acoplamiento es grande, pero sin embargo nos aportan una idea tangible sobre algunas de sus características de acoplamiento fuerte. Cuando la constante de acoplamiento de una teoría de cuerdas determinada aumenta más allá del dominio accesible para la teoría de perturbación, nuestros limitados conocimientos se quedan anclados en los estados BPS. Al igual que unas pocas palabras elegidas en una lengua extranjera, veremos que los estados BPS nos llevan bastante lejos.

La dualidad en la teoría de cuerdas

Siguiendo a Witten, comencemos con una de las cinco teorías de cuerdas, por ejemplo la cuerda Tipo I, y supongamos que todas y cada una de sus nueve dimensiones espaciales son planas y extendidas. Esto, por supuesto, no es en absoluto realista, pero hace que la discusión sea más sencilla; en breve retornaremos a las dimensiones arrolladas. Comenzamos suponiendo que la constante de acoplamiento de cuerdas es mucho menor que 1. En este caso, las herramientas perturbativas son válidas, y por lo tanto muchas de las propiedades de la teoría se han podido estudiar, y se han estudiado, con exactitud. Si aumentamos el valor de la constante de acoplamiento, pero seguimos manteniéndola muy por debajo de 1, todavía se pueden utilizar los métodos perturbativos. Las propiedades de la teoría cambiarán algo; por ejemplo, los valores numéricos asociados a la dispersión de una cuerda con respecto a otra serán un poco diferentes, porque los procesos de bucles múltiples de la Figura 12.6 aparecen con mayor frecuencia cuando aumenta la constante de acoplamiento. Sin embargo, más allá de estos cambios en las propiedades numéricas, el contenido físico general de la teoría sigue siendo el mismo, siempre que el valor de la constante de acoplamiento permanezca en el dominio perturbativo.

Cuando aumentamos la constante de acoplamiento de cuerdas de la teoría del Tipo I más allá del valor 1, los métodos perturbativos dejan de ser válidos, por lo que hemos de centrarnos sólo en el conjunto limitado de las masas y cargas no

perturbativas —los estados BPS— que siguen estando dentro de nuestra capacidad de comprensión. He aquí lo que Witten argumentó, y posteriormente confirmó en un trabajo conjunto con Joe Polchinski de la Universidad de California en Santa Bárbara: *Estas características del acoplamiento fuerte de la teoría de cuerdas del Tipo I concuerdan exactamente con ciertas propiedades conocidas de la teoría de cuerdas Heterótica-O, cuando esta última tiene un valor pequeño para su constante de acoplamiento de cuerdas*. Es decir, cuando la constante de acoplamiento de la cuerda Tipo I es grande, las masas y cargas que sabemos calcular son exactamente iguales que las de la cuerda Heterótica-O cuando la constante de acoplamiento de esta última es pequeña. Esto nos da una clara indicación de que estas dos teorías de cuerdas, que a primera vista, como el agua y el hielo, parecen completamente diferentes, en realidad son duales. Esto sugiere persuasivamente que las propiedades físicas de la teoría del Tipo I para grandes valores de su constante de acoplamiento son idénticas a las propiedades físicas de la teoría Heterótica-O para pequeños valores de su constante de acoplamiento.[105] Hay otros argumentos afines que proporcionan pruebas igualmente convincentes de que la inversa también es cierta: las propiedades físicas de la teoría del Tipo I para pequeños valores de su constante de acoplamiento son idénticas a las de la teoría Heterótica-O para grandes valores de su constante de acoplamiento.

Aunque las dos teorías de cuerdas parecen no estar relacionadas cuando se analizan utilizando el esquema de aproximación perturbativo, ahora vemos que la una se transforma en la otra —en cierto modo como la transformación del agua en hielo y viceversa— cuando los valores de sus constantes de acoplamiento se hacen variar.

Este nuevo y fundamental descubrimiento, en el que las propiedades físicas del acoplamiento fuerte de una teoría se pueden describir mediante las propiedades físicas del acoplamiento débil de otra teoría, se conoce como *dualidad fuerte-débil*. Como en los casos de otras dualidades que hemos comentado anteriormente, ésta nos dice que las dos teorías implicadas no son en realidad distintas. Al contrario, son dos descripciones diferentes de una misma teoría subyacente. A diferencia de la dualidad trivial inglés-chino, la dualidad de los acoplamientos fuerte-débil es muy poderosa. Cuando la constante de acoplamiento de una de las teorías de un par dual es pequeña, podemos analizar sus propiedades físicas utilizando las bien conocidas herramientas perturbativas. Si la constante de acoplamiento de la teoría es grande, y por consiguiente fallan los métodos perturbativos, sabemos ahora que podemos utilizar la descripción dual —una descripción en la que la constante de acoplamiento relevante es pequeña— y volver al uso de las herramientas perturbativas. Esta traslación ha dado como resultado que dispongamos de métodos cuantitativos para analizar una teoría que inicialmente situábamos más allá de nuestras capacidades teóricas.

Demostrar realmente que las propiedades físicas del acoplamiento fuerte de la

teoría de cuerdas del Tipo I son idénticas a las propiedades físicas del acoplamiento débil de la teoría Heterótica-O, y viceversa, es una tarea extremadamente difícil que aún no se ha logrado realizar. La razón es sencilla. Un miembro de ese par de teorías supuestamente duales no es dócil al análisis perturbativo, ya que su constante de acoplamiento es demasiado grande. Esto impide que se efectúen los cálculos directos de muchas de sus propiedades físicas. De hecho, es precisamente esto lo que hace tan potente la dualidad propuesta, ya que, si es cierta, proporciona un nuevo instrumento para analizar una teoría que tenga un acoplamiento fuerte: la utilización de métodos perturbativos en su descripción dual con acoplamiento débil.

Pero, incluso si no podemos demostrar que las dos teorías son duales, la perfecta correspondencia entre aquellas propiedades que *podemos* determinar con fiabilidad proporciona pruebas extraordinariamente convincentes de que es correcta la supuesta relación de los acoplamientos fuerte-débil entre las teorías de cuerdas del Tipo I y Heterótica-O. De hecho, los cálculos cada vez más inteligentes que se han realizado para comprobar la supuesta dualidad han dado siempre resultados positivos. La mayoría de los expertos en teoría de cuerdas están convencidos de que la dualidad es cierta.

Siguiendo el mismo método, se pueden estudiar las propiedades del acoplamiento fuerte en otra de las teorías de cuerdas, digamos, la del Tipo IIB. Tal como Hull y Townsend supusieron inicialmente y luego quedó justificado mediante los trabajos de investigación de una cantidad de físicos, parece suceder algo igualmente extraordinario. A medida que la constante de acoplamiento de la teoría de cuerdas del Tipo IIB se va haciendo cada vez más grande, las propiedades físicas que somos capaces de comprender parecen coincidir exactamente con las de la propia teoría de cuerdas del Tipo IIB con acoplamiento débil. En otras palabras, la teoría de cuerdas del Tipo IIB es dual consigo misma o *autodual*.[106] Específicamente, los análisis detallados que se van realizando sugieren de una forma muy persuasiva que si la constante de acoplamiento de la teoría del Tipo IIB fuera mayor que 1, y si cambiáramos su valor por su inverso (cuyo valor es, por lo tanto, menor que 1), la teoría resultante sería absolutamente idéntica a aquella con la que comenzamos. De un modo similar a lo que hallamos al intentar comprimir una dimensión circular hasta una longitud de una escala inferior a la de Planck, si intentamos aumentar la constante de acoplamiento de la teoría del Tipo IIB hasta un valor mayor que 1, la autodualidad demuestra que la teoría resultante es exactamente equivalente a la teoría de cuerdas del Tipo IIB con una constante de acoplamiento menor que 1.

Un resumen de lo visto hasta el momento

Veamos dónde estamos. Para mediados de la década de 1980, los físicos habían construido cinco teorías de supercuerdas diferentes. En el esquema de aproximación de la teoría de perturbación, todas ellas parecen ser distintas. Pero este método de aproximación sólo es válido si la constante de acoplamiento de cuerdas de una teoría dada es menor que 1. Lo que se esperaba era que los físicos fueran capaces de calcular el valor exacto de la constante de acoplamiento de cuerdas de cualquier teoría de cuerdas determinada, pero la forma de las ecuaciones de aproximación disponibles actualmente hace que esto sea imposible. Por este motivo, los físicos se han planteado el objetivo de estudiar cada una de las cinco teorías de cuerdas para una gama de posibles valores de sus respectivas constantes de acoplamiento, tanto menores como mayores que 1, es decir, tanto para el acoplamiento débil como para el fuerte. Sin embargo, los tradicionales métodos perturbativos no permiten averiguar nada sobre las características del acoplamiento fuerte en ninguna de las teorías de cuerdas.

Recientemente, utilizando el poder de la supersimetría, los físicos han aprendido cómo se pueden calcular algunas de las propiedades del acoplamiento fuerte en una teoría de cuerdas dada. Y, para sorpresa de la mayoría de los que trabajan en este campo, las propiedades del acoplamiento fuerte de la cuerda Heterótica-O han resultado ser idénticas a las propiedades del acoplamiento débil de la cuerda del Tipo I, y viceversa. Además, las propiedades físicas del acoplamiento fuerte de la teoría de cuerdas del Tipo IIB son idénticas a las que presenta esta misma teoría cuando en ella el acoplamiento es débil. Estos vínculos inesperados nos animan a seguir los trabajos de Witten y a insistir con las otras teorías, es decir, la del Tipo IIA y la Heterótica-E, para ver cómo encajan en el panorama general. Aquí nos encontraremos con sorpresas aún más exóticas. Con el fin de preparamos para esto, necesitamos una breve digresión histórica.

Supergravedad

A finales de la década de 1970 y principios de la de 1980, antes de que surgiera el interés por la teoría de cuerdas, muchos físicos teóricos buscaban una teoría unificada de la mecánica cuántica, la gravedad y las otras fuerzas que actúan en el marco de la teoría de campos cuánticos de partículas puntuales. Se tenía la esperanza de que las contradicciones entre las teorías de partículas puntuales en las que intervenía la gravedad y la mecánica cuántica se superaran estudiando teorías en las que hubiera un gran reparto de simetría. En 1976, Daniel Freedman, Sergio Ferrara y Peter Van

Nieuwenhuizen, todos ellos de la Universidad Estatal de Nueva York en Stony Brook, descubrieron que las teorías más prometedoras eran aquellas en las que intervenía la supersimetría, ya que la tendencia de los bosones y los fermiones a dar fluctuaciones cuánticas productoras de cancelaciones contribuía a calmar el violento frenesí microscópico. Los autores acuñaron el término *supergravedad* para describir las teorías de campos cuánticos supersimétricos que intentan incorporar la relatividad general. Estos intentos de fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica desembocaron finalmente en fracasos. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo 8, de estas investigaciones se podía aprender una lección presciente, una que presagiaba el desarrollo de la teoría de cuerdas.

La lección, que quizá llegó a estar más clara gracias al trabajo de Eugene Cremmer, Bernard Julia, y Scherk, todos ellos en la *École Normale Supérieure* en 1978, decía que los intentos que llegaron a estar más cerca del éxito fueron las teorías de supergravedad formuladas, no en cuatro dimensiones, sino en más. Específicamente, las más prometedoras fueron las versiones que apelaban a diez u once dimensiones, siendo el máximo posible, según parece, las once dimensiones. [107] Se llegó a entrar en contacto con cuatro dimensiones en el marco, una vez más, de Kaluza y Klein: Las dimensiones adicionales resultaron ser arrolladas. En las teorías de diez dimensiones, como en la teoría de cuerdas, seis dimensiones eran arrolladas, mientras que en la teoría de once dimensiones, lo eran siete de ellas.

Cuando la teoría de cuerdas cautivó a rabiar a los físicos en 1984, los puntos de vista sobre las teorías de supergravedad con partículas puntuales cambiaron drásticamente. Como se ha enfatizado repetidas veces, si examinamos una cuerda con la precisión que permite la ciencia actual, y con la que permitirá en un futuro previsible, dicha cuerda parece una partícula puntual. Podemos precisar aún más esta observación informal: cuando se estudian procesos de baja energía en teoría de cuerdas —los procesos que no tienen energía suficiente para comprobar la naturaleza ultramicroscópica, extendida de la cuerda— podemos aproximar una cuerda mediante una partícula puntual sin estructura, utilizando el marco de la teoría de campos cuánticos de partículas puntuales. No podemos utilizar esta aproximación cuando se trata de procesos con distancias cortas o altas energías, porque sabemos que la naturaleza extendida de la cuerda es crucial para poder resolver los conflictos entre la relatividad general y la mecánica cuántica que una teoría de partículas puntuales no puede resolver. Pero a energías suficientemente bajas —con distancias suficientemente grandes— estos problemas no se dan, por lo que a menudo se hace una aproximación de este tipo por razones de conveniencia para el cálculo.

La teoría de campos cuánticos que realiza de esta manera una aproximación de la teoría de cuerdas con un máximo de precisión no es otra que la supergravedad de diez dimensiones. Las propiedades especiales de la supergravedad de diez dimensiones,

descubierta en las décadas de 1970 y 1980, se consideran actualmente como vestigios de baja energía del potencial subyacente de la teoría de cuerdas. Los investigadores que estudian la supergravedad de diez dimensiones han descubierto la punta de un iceberg muy profundo —la rica estructura de la teoría de supercuerdas—. De hecho, resulta que existen cuatro teorías diferentes de supergravedad con diez dimensiones, que difieren en detalles concernientes al modo preciso en que se incorpora la supersimetría. Tres de estas teorías han resultado ser las aproximaciones mediante partículas puntuales de baja energía de la cuerda del Tipo IIA, de la cuerda Tipo IIB y de la cuerda Heterótica-E. Las cuatro dan la aproximación mediante partículas puntuales de baja energía, tanto de la cuerda Tipo I, como de la cuerda Heterótica-O; En retrospectiva, éste fue el primer indicio de la estrecha conexión entre estas dos teorías de cuerdas.

Se trata de una historia muy atildada, salvo por el hecho de que parece que se ha dejado olvidada la supergravedad de once dimensiones. La teoría de cuerdas, formulada en diez dimensiones, parece no tener sitio para encajar una teoría de once dimensiones. Durante varios años, la opinión general que sostenía la mayoría, pero no la totalidad, de los especialistas en teoría de cuerdas era que la supergravedad de once dimensiones constituía una extravagancia matemática sin conexión alguna con la física de la teoría de cuerdas.[108]

Vislumbres de la Teoría-M

El punto de vista actual es muy diferente. En el congreso sobre cuerdas del año 1995, *Strings'95*, Witten argumentó que, si comenzábamos con la cuerda Tipo IIA y aumentábamos su constante de acoplamiento desde un valor mucho menor que 1 hasta un valor mucho mayor que 1, las propiedades físicas que aún podremos analizar (esencialmente las de las configuraciones saturadas BPS) tienen una aproximación de baja energía que es la supergravedad de once dimensiones.

Cuando Witten lo anunció, este descubrimiento dejó estupefacta a la audiencia y, desde entonces, siempre ha conmovido a la comunidad de estudiosos de la teoría de cuerdas. Para casi todos los que se dedicaban a este campo, fue un descubrimiento completamente inesperado. La primera reacción del lector ante este hallazgo puede ser un eco de lo que sintieron la mayoría de los expertos en esta disciplina: *¿Cómo puede una teoría específica para once dimensiones ser relevante para otra teoría que se desarrolla en diez dimensiones?*

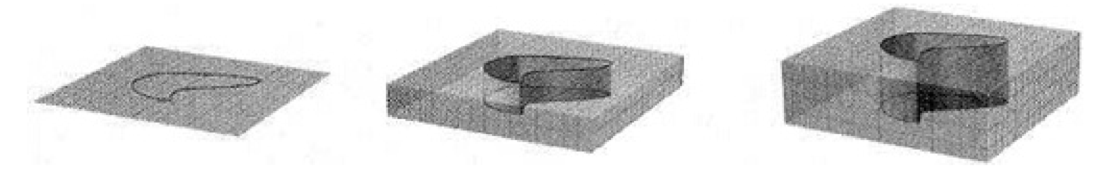


Figura 12.7 A medida que se incrementa la constante de acoplamiento de la cuerda Heterótica-E, una nueva dimensión espacial aparece y la cuerda misma se estira hasta adoptar una forma de membrana cilíndrica.

La respuesta tiene una significación profunda. Para comprenderla, hemos de describir de una manera más precisa el descubrimiento de Witten. En realidad, es más fácil ilustrar en primer lugar un hallazgo estrechamente relacionado que Witten y un becario posdoctoral de la Universidad de Princeton, Petr Horava, descubrieron posteriormente, y que se enfoca en la cuerda Heterótica-E. Descubrieron que la fuertemente acoplada cuerda Heterótica-E también tiene una descripción de once dimensiones, y la Figura 12.7 muestra el porqué. En el extremo izquierdo de la figura tomamos un valor mucho menor que 1 para la constante de acoplamiento de la cuerda Heterótica-E. Éste es el dominio que hemos estado describiendo en capítulos anteriores y que los especialistas en teoría de cuerdas han estudiado durante bastante más de una década. A medida que nos movemos hacia la derecha en la Figura 12.7, aumentamos sucesivamente el valor de la constante de acoplamiento. Antes de 1995, los especialistas en teoría de cuerdas sabían que esto haría que los procesos con bucles (véase la Figura 12.6) fueran cada vez más importantes y, a medida que la constante de acoplamiento se hiciera mayor, invalidaría finalmente por completo el marco de la teoría de perturbación. Pero lo que ninguno sospechaba era que, cuando la constante de acoplamiento se va haciendo mayor, ¡una nueva dimensión se hace visible! Ésta es la dimensión «vertical» que se muestra en la Figura 12.7. Recordemos que en esta figura la rejilla bidimensional con la que comenzamos representa las nueve dimensiones espaciales de la cuerda Heterótica-E. Por lo tanto, la nueva dimensión vertical representa una *décima* dimensión espacial que, junto con el tiempo, nos lleva a un total de once dimensiones del espacio-tiempo.

Además, la Figura 12.7 ilustra una profunda consecuencia de esta nueva dimensión. La *estructura* de la cuerda Heterótica-E cambia a medida que esta dimensión crece. Se estira desde su forma de bucle unidimensional hasta convertirse en una cinta y luego en un cilindro deformado a medida que aumentamos el valor de la constante de acoplamiento. En otras palabras, la cuerda Heterótica-E *es en realidad una membrana bidimensional* cuya anchura (la extensión vertical en la Figura 12.7) está controlada por el valor de la constante de acoplamiento. Durante más de una década, los especialistas en teoría de cuerdas siempre han utilizado métodos perturbativos que están firmemente enraizados en la hipótesis de que la constante de acoplamiento es muy pequeña. Como argumentó Witten, esta hipótesis ha hecho que

los componentes fundamentales parezcan cuerdas unidimensionales, y se comporten como tales, aunque en realidad tienen una segunda dimensión espacial oculta. Abandonando la suposición de que la constante de acoplamiento es muy pequeña y considerando las propiedades físicas de la cuerda Heterótica-E cuando la constante de acoplamiento es grande, aparece de forma manifiesta la segunda dimensión.

Esta constatación no invalida ninguna de las conclusiones que hemos descrito en los capítulos anteriores, pero nos obliga a contemplarlas dentro de un nuevo marco. Por ejemplo, ¿cómo engrana todo esto con la dimensión temporal y las nueve dimensiones espaciales que requiere la teoría de cuerdas? Bueno, recordemos que, según se dijo en el capítulo 8, esta restricción surge de contar el número de direcciones independientes en las que puede vibrar una cuerda, y de exigir que este número sea el correcto para garantizar que las probabilidades mecánico cuánticas tengan valores coherentes. La nueva dimensión que acabamos de descubrir *no es* una en la que una cuerda Heterótica-E pueda vibrar, ya que se trata de una dimensión que está contenida en la estructura de las propias «cuerdas». Dicho de otro modo, el marco perturbativo que los físicos utilizan para deducir el requerimiento del espacio-tiempo de diez dimensiones, es asumido a partir del principio de que la constante de acoplamiento de la cuerda Heterótica-E es pequeña. Aunque no se reconoció hasta mucho más tarde, esto de manera implícita refuerza dos aproximaciones mutuamente consistentes: que la anchura de la membrana de la Figura 12.7 es pequeña, lo que la hace parecer una cuerda, y que la undécima dimensión es *tan* pequeña que queda más allá de la sensibilidad de las ecuaciones perturbativas. Dentro de este esquema de aproximación, nos vimos llevados a visualizar un universo de diez dimensiones lleno de cuerdas unidimensionales. Ahora vemos que esto no es sino una aproximación a un universo de once dimensiones que contiene membranas bidimensionales.

Por razones técnicas, Witten descubrió por primera vez la dimensión undécima en sus estudios de las propiedades del acoplamiento fuerte de la cuerda del Tipo IIA, y ahí la historia es muy similar. Como en el ejemplo de la cuerda Heterótica-E, hay una undécima dimensión cuyo tamaño está controlado por la constante de acoplamiento de la cuerda del Tipo IIA. Cuando su valor es incrementado, la nueva dimensión crece. Mientras lo hace, decía Witten, la cuerda del Tipo IIA, en vez de estirarse hasta ser una cinta como en el caso de la cuerda Heterótica-E, se expande formando una «cámara de bicicleta», como se ilustra en la Figura 12.8. Una vez más, Witten afirmaba que, aunque los especialistas en teoría de cuerdas siempre han considerado las cuerdas del Tipo IIA como objetos unidimensionales, dotados de longitud pero no de anchura, este punto de vista es un reflejo del esquema de aproximación perturbativo en el que se supone que la constante de acoplamiento de las cuerdas es pequeña. Si la naturaleza *requiere* un valor pequeño de esta constante de acoplamiento, entonces tenemos una aproximación fiable. No obstante, los

argumentos de Witten y los planteados por otros físicos durante la segunda revolución de las supercuerdas aportan pruebas contundentes de que las «cuerdas» del Tipo IIA y las Heteróticas-E son, fundamentalmente, membranas bidimensionales que viven en un universo de once dimensiones.



Figura 12.8 A medida que se incrementa la constante de acoplamiento de la cuerda Tipo IIA, las cuerdas se expanden desde un bucle unidimensional hasta objetos bidimensionales que lucen como la superficie de una cámara de bicicleta.

Pero ¿qué *es* esta teoría con once dimensiones? A bajas energías (bajas comparadas con la energía de Planck), según los argumentos de Witten y otros, esta teoría se aproxima mediante la teoría de campos cuánticos de supergravedad en once dimensiones, una teoría que durante mucho tiempo fue ignorada. Pero, para energías altas, ¿cómo podemos describir esta teoría? Esta cuestión se está investigando actualmente de manera intensa. Sabemos por las Figuras 12.7 y 12.8 que la teoría de once dimensiones contiene objetos extendidos bidimensionales, es decir membranas bidimensionales. Además, como pronto veremos, los objetos extendidos de otras dimensiones desempeñan también un papel importante. Pero, más allá de una mescolanza de propiedades, *nadie sabe qué es esta teoría de once dimensiones*. ¿Son las membranas sus componentes fundamentales? ¿Cuáles son las propiedades que definen esta teoría? ¿Cómo se conecta su contenido con la física que conocemos? Si las constantes de acoplamiento respectivas son pequeñas, las mejores respuestas que podemos dar por ahora a estas preguntas están ya explicadas en capítulos anteriores, ya que para constantes de acoplamiento pequeñas nos remitimos a la teoría de cuerdas. Pero, si las constantes de acoplamiento no son pequeñas, nadie conoce por ahora las respuestas.

Sea lo que sea esta teoría de once dimensiones, Witten la denominó provisionalmente *Teoría-M*. Este nombre tiene tantos significados como respuestas quiera dar la gente. Algunos ejemplos: Teoría del Misterio, Teoría Madre (como la «Madre de todas las Teorías»), Teoría de la Membrana (ya que, sea lo que sea, las membranas parecen ser parte de la historia), Teoría Matriz (según ciertos trabajos recientes de Tom Banks de la *Rutgers University*, Willy Fischler de la Universidad de Texas en Austin, Stephen Shenker de la *Rutgers University*, y Susskind, que ofrece otra original interpretación de la teoría). Pero, incluso sin tener un dominio sólido de

su nombre o de sus propiedades, está claro a estas alturas que la Teoría-M proporciona un sustrato unificado para llevar las cinco teorías de cuerdas a ser una sola teoría.

La Teoría-M y la red de interconexiones

Hay un viejo proverbio que habla de tres hombres ciegos y un elefante. El primer hombre ciego agarra el colmillo de marfil del elefante y describe la superficie dura y lisa que percibe. El segundo hombre ciego pone su mano en una de las patas del elefante y describe la masa muscular enorme y robusta que siente al tacto. El tercer hombre ciego agarra la cola del elefante y describe el apéndice delgado y nervudo que percibe. Dado que las descripciones que se comunican el uno al otro son tan diferentes y puesto que ninguno de ellos puede ver a los otros, piensan que cada uno ha agarrado un animal diferente. Durante muchos años, los físicos estuvieron en una oscuridad parecida a la de los tres hombres ciegos, pensando que las distintas teorías de cuerdas *eran* muy diferentes. Pero actualmente, gracias a los hallazgos de la segunda revolución de las supercuerdas, los físicos han constatado que la Teoría-M es el paquidermo que unifica las cinco teorías de cuerdas.

En este capítulo hemos comentado los cambios en nuestra forma de comprender la teoría de cuerdas que surgen cuando nos aventuramos más allá del dominio del marco perturbativo, un marco que implícitamente ya estábamos utilizando antes de este capítulo. La Figura 12.9 resume las interrelaciones que hemos encontrado hasta ahora, con unas flechas que indican las teorías duales. Como se puede ver, tenemos una red de conexiones, pero aún no está completa. Podemos terminar el trabajo incluyendo también las dualidades del capítulo 10.

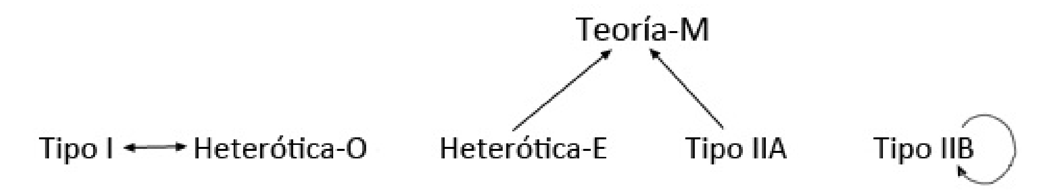


Figura 12.9 Las flechas muestran cuales teorías son duales con otras.

Recordemos la dualidad grande/pequeño del radio, que intercambia una dimensión circular de radio *R* con otra cuyo radio es 1/R. Anteriormente, hemos dejado encubierto uno de los aspectos de esta dualidad y ahora tenemos que aclararlo. En el capítulo 10 explicábamos las propiedades de las cuerdas en un universo con una

dimensión circular, sin especificar cuidadosamente con cuál de las cinco formulaciones de la teoría de cuerdas estábamos trabajando. Argumentábamos que el intercambio de los modos de arrollamiento y vibración de una cuerda nos permite reformular exactamente la descripción, según la teoría de cuerdas, de un universo provisto de una dimensión circular de radio 1/R en los términos de otra dimensión circular cuyo radio es R. La cuestión que dejábamos sin aclarar era que las teorías de cuerdas del Tipo IIA y del Tipo IIB en realidad se intercambian por esta dualidad, al igual que lo hacen las teorías de cuerdas Heterótica-O y Heterótica-E. Es decir, la afirmación más precisa sobre la dualidad del radio grande/pequeño es la siguiente: las propiedades físicas de la cuerda del Tipo IIA en un universo dotado de una dimensión circular de radio *R* son absolutamente idénticas a las propiedades físicas de la cuerda del Tipo IIB en un universo dotado de una dimensión circular de radio 1/R (una afirmación similar es válida para las cuerdas Heterótica-E y Heterótica-O). Este reajuste de la dualidad grande/pequeño del radio no tiene efectos significativos sobre las conclusiones del capítulo 10, pero sí que tiene un impacto importante sobre la discusión actual.

La razón de esto es que estableciendo un vínculo entre las teorías de cuerdas del Tipo IIA y del Tipo IIB, así como entre la Heterótica-O y la Heterótica-E, la dualidad grande/pequeño del radio completa la red de conexiones, como se ilustra mediante las líneas de puntos en la Figura 12.10. Esta figura muestra que las cinco teorías de cuerdas, junto con la Teoría-M, son duales entre sí. Están todas ellas unidas en un sólo marco teórico; estas teorías proporcionan cinco planteamientos diferentes para explicar las propiedades físicas subyacentes, que son únicas e iguales para todas las teorías. Para alguna aplicación determinada, un enunciado puede ser mucho más efectivo que otro. Por ejemplo, es mucho más fácil trabajar con la teoría Heterótica-O, cuyo acoplamiento es débil, que hacerlo con la teoría de cuerdas del Tipo I, cuyo acoplamiento es fuerte. Sin embargo, ambas teorías describen exactamente las mismas propiedades físicas.

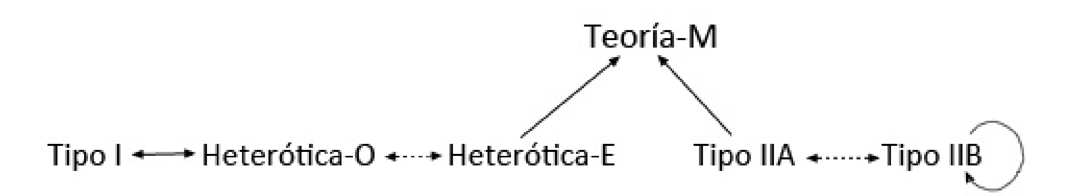


Figura 12.10 Incluyendo las dualidades que involucran la forma geométrica del espacio-tiempo (como en el Capítulo 10), las cinco teorías de cuerdas y la Teoría-M se reúnen en una red de dualidades.

El panorama general

Ahora podemos comprender más plenamente las dos figuras —la Figura 12.1 y la 12.2— que presentábamos al principio de este capítulo para resumir los aspectos esenciales. En la Figura 12.1 vemos que antes de 1995, sin tener en cuenta ninguna clase de dualidad, teníamos cinco teorías de cuerdas aparentemente distintas. Varios físicos trabajaban en cada una de ellas, pero sin un entendimiento de las dualidades ellas parecen ser teorías diferentes. Cada una de estas teorías poseía características variables tales como el valor de su constante de acoplamiento y la forma geométrica y los tamaños de las dimensiones arrolladas. Se tenía la esperanza (y se tiene aún) de que estas propiedades definitorias estarían determinadas por la propia teoría, pero sin la capacidad de determinarlas mediante las ecuaciones de aproximación actuales, los físicos habían estudiado naturalmente las propiedades físicas que se deducían a partir de toda una gama de posibilidades. Esto está representado en la Figura 12.1 mediante las zonas sombreadas —cada punto de una de estas zonas representa una opción específica para la constante de acoplamiento y la geometría arrollada. Sin invocar ninguna dualidad, seguíamos teniendo cinco (conjuntos de) teorías disjuntas.

Pero ahora, si aplicamos todas las dualidades que hemos comentado, a medida que hagamos variar los parámetros de acoplamiento y de la geometría, podemos pasar de una teoría a cualquier otra, siempre y cuando incluyamos también la zona central de la Teoría-M, que actúa como unificadora; esto se muestra en la Figura 12.2. Aunque sólo tenemos un escaso conocimiento de la Teoría-M, estos argumentos indirectos dan un fuerte apoyo a la afirmación de que esta teoría proporciona un sustrato unificador para nuestras cinco teorías de cuerdas, a las que ingenuamente habíamos considerado distintas. Además, hemos averiguado que la Teoría-M está estrechamente relacionada con una sexta teoría —la supergravedad de once dimensiones— y esto se representa en la Figura 12.11, que es una versión más precisa de la Figura 12.2.[109]

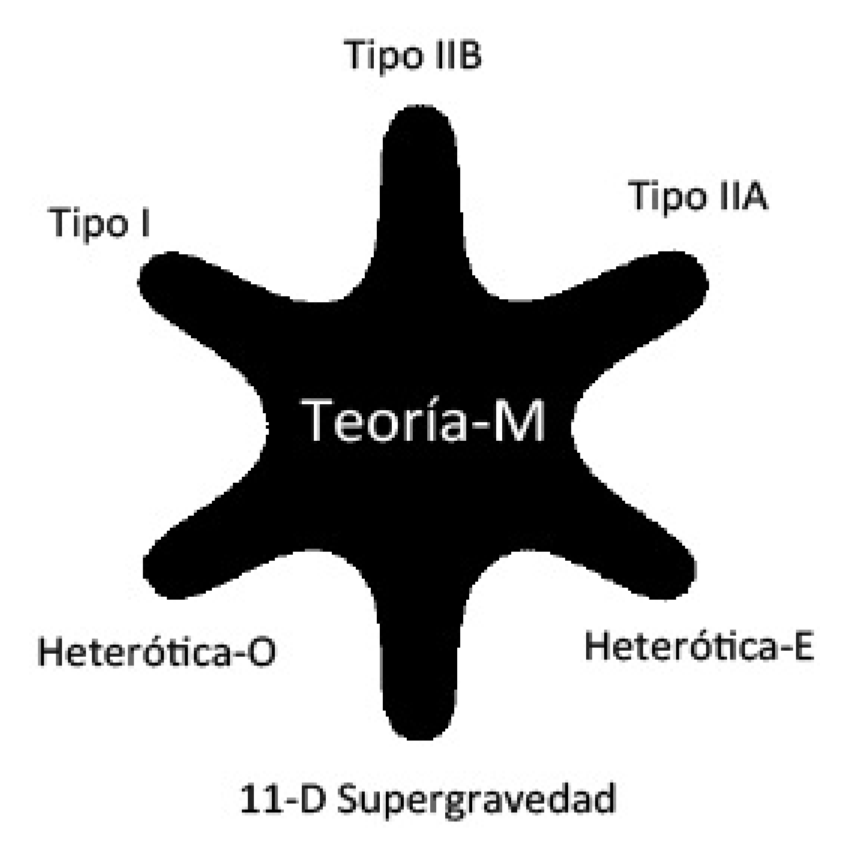


Figura 12.11 Incorporando las dualidades, las cinco teorías de cuerdas, la supergravedad de once dimensiones, y la Teoría-M se mezclan en un marco unificado.

La Figura 12.11 indica que las ideas fundamentales y las ecuaciones de la Teoría-M, aunque sólo se comprendan parcialmente por el momento, unifican las de todas las formulaciones de la teoría de cuerdas. La Teoría-M es el elefante teórico que ha abierto los ojos a los especialistas en teoría de cuerdas para que pudieran contemplar un marco unificador mucho más importante.

Una característica sorprendente de la teoría M: la democracia en extensión

Cuando la constante de acoplamiento de cuerdas es pequeña en cualquiera de las cinco zonas peninsulares superiores del esquema teórico que vemos en la Figura 12.11, el ingrediente fundamental de la teoría resulta ser una cuerda unidimensional. Sin embargo, acabamos de conseguir un nuevo punto de vista sobre esta cuestión. Si partimos de las zonas Heterótica-E o del Tipo IIA y aumentamos el valor de las respectivas constantes de acoplamiento de cuerdas, nos desplazamos hacia el centro del esquema de la Figura 12.11 y, las que parecían ser cuerdas unidimensionales se estiran convirtiéndose en membranas bidimensionales. Además, a través de una

sucesión más o menos intrincada de relaciones de dualidad que involucran a las constantes de acoplamiento de cuerdas y a la forma concreta de las dimensiones espaciales arrolladas, podemos movernos de una manera continua y sin baches desde un punto a otro cualquiera dentro de la Figura 12.11. Dado que las membranas bidimensionales que hemos descubierto desde las perspectivas de la teoría Heterótica-E y la teoría del Tipo IIA se pueden recorrer a medida que nos desplazamos hacia cualquiera de las otras tres teorías de cuerdas de la Figura 12.11, averiguamos así que cada una de las cinco teorías de cuerdas incluye también membranas bidimensionales.

Esto nos plantea dos preguntas. En primer lugar, ¿son las membranas bidimensionales el auténtico ingrediente fundamental de la teoría de cuerdas? Y la segunda pregunta, teniendo en cuenta que en la década de 1970 y principios de la de 1980 se hizo el gran salto de las partículas puntuales de dimensión cero a las cuerdas unidimensionales, y después de haber visto que actualmente la teoría de cuerdas incluye membranas bidimensionales, ¿podría ser que en la teoría haya también ingredientes de dimensiones aún más elevadas? En el momento de escribir esto, las respuestas a estas preguntas todavía no se conocen del todo, pero la situación parece ser como explicamos a continuación.

Teníamos grandes esperanzas puestas en la supersimetría para conseguir algún conocimiento relativo a cada una de las formulaciones de la teoría de cuerdas más allá del dominio de validez de los métodos de aproximación perturbativos. En particular, las propiedades de los estados BPS, sus masas y sus cargas de fuerza, se determinan únicamente mediante la supersimetría, y esto nos permite entender algunas de sus características relativas al acoplamiento fuerte sin tener que efectuar cálculos directos de una dificultad inimaginable. De hecho, gracias a los esfuerzos iniciales de Horowitz y Strominger, y a los subsiguientes trabajos innovadores de Polchinski, actualmente sabemos más acerca de esos estados BPS. Concretamente, no sólo conocemos las masas y las cargas de fuerza que transportan, sino que también comprendemos claramente el *aspecto* que tienen. Además, esta imagen es quizá el más sorprendente de todos los descubrimientos. Algunos de los estados BPS son cuerdas unidimensionales. Otros son membranas bidimensionales. Por ahora, estas formas resultan familiares. Pero, la sorpresa es que hay otras más que son tridimensionales, o de cuatro dimensiones; de hecho, la gama de las posibilidades abarca todas las dimensiones espaciales hasta *nueve* inclusive. La teoría de cuerdas, o la Teoría-M, o como quiera que por fin se llame, contiene en realidad objetos extendidos de toda una amplia gama de dimensiones espaciales. Los físicos han acuñado el término «tribrana» para designar objetos de tres dimensiones espaciales, «tetrabrana» para los de cuatro dimensiones espaciales, y así sucesivamente hasta las «nonabranas» o membranas de nueve dimensiones (y, más en general, para un objeto

de *p* dimensiones espaciales, siendo *p* un número entero, los físicos han acuñado una expresión tan poco eufónica como *pi-brana*). A veces, utilizando esta terminología, las cuerdas se denominan unibranas y a las membranas se les llama bi-branas. El hecho de que todos estos objetos extendidos sean realmente parte de la teoría impulsó a Paul Townsend a declararla «democracia de las branas».

A pesar de esta democracia de las branas, las cuerdas —objetos extendidos unidimensionales— son un caso especial por las siguientes razones. Los físicos han demostrado que la masa de los objetos extendidos de cualquier dimensión, salvo la de las cuerdas unidimensionales, es *inversamente* proporcional al valor de la constante de acoplamiento asociada cuando estamos en cualquiera de las cinco regiones de la teoría de cuerdas de la Figura 12.11. Esto significa que con un acoplamiento débil de cuerdas, en cualquiera de las cinco formulaciones, todo tendrá una masa enorme salvo las cuerdas —órdenes de magnitud mayores que la masa de Planck—. Debido a que son tan pesadas y dado que, a partir de la ecuación $E = mc^2$, *requieren* una energía increíblemente alta para ser producidas, las branas sólo ejercen un pequeño efecto en muchas de las propiedades físicas, pero no en todas, como veremos en el próximo capítulo. Sin embargo, cuando nos aventuramos fuera de las regiones peninsulares de la Figura 12.11, las branas de dimensiones superiores se vuelven más ligeras y por lo tanto resultan cada vez más numerosas.[110]

Por consiguiente, la imagen que hemos de retener es la siguiente. En la región central de la Figura 12.11, tenemos una teoría cuyos ingredientes fundamentales no son precisamente cuerdas o membranas, sino «branas» de una variedad de dimensiones, todas ellas más o menos en condiciones de igualdad. Actualmente, no tenemos un dominio firme sobre muchas características esenciales de esta teoría completa. Pero algo que sí sabemos es que cuando nos desplazamos de la región central hacia cualquiera de las zonas peninsulares, sólo las cuerdas (o las membranas arrolladas cuyo aspecto es cada vez más el de las cuerdas, como en las Figuras 12.7 y 12.8) son lo suficientemente ligeras como para entrar en contacto con la física tal como la conocemos —las partículas de la Tabla 1.1 y las cuatro fuerzas mediante las cuales interaccionan—. Los análisis perturbativos que los especialistas en cuerdas han utilizado durante cerca de dos décadas no se han refinado lo suficiente para descubrir ni siquiera la existencia de los objetos extendidos de enorme masa que se podrían encontrar en otras dimensiones; las cuerdas dominaban los análisis y a la teoría se le dio el poco democrático nombre de teoría de cuerdas. Una vez más, en esas regiones de la Figura 12.11 estamos habilitados, por la mayor parte de las consideraciones, para ignorar todo salvo las cuerdas. En esencia, es lo que hemos hecho hasta ahora en este libro. Sin embargo, ahora vemos que en realidad la teoría es más rica que cualquier otra que se haya imaginado anteriormente.

¿Puede algo de esto responder las preguntas sin respuesta de la teoría de cuerdas?

Sí Y no. Hemos conseguido profundizar en nuestro conocimiento liberándonos de ciertas conclusiones que, en retrospectiva, más que auténtica física de cuerdas eran consecuencia de análisis perturbativos aproximados. Sin embargo, el alcance que tienen actualmente nuestros instrumentos no perturbativos es muy limitado. El descubrimiento de la notable red de relaciones de dualidad nos permite lograr una visión mucho más amplia de la teoría de cuerdas, pero quedan sin resolver muchas cuestiones. En este momento, por ejemplo, no sabemos cómo ir más allá de las ecuaciones aproximadas para el cálculo del valor de la constante de acoplamiento de cuerdas —unas ecuaciones que, como ya hemos visto, son demasiado burdas para damos una información realmente útil—. Tampoco tenemos una idea clara de por qué existen exactamente tres dimensiones espaciales extendidas, o de cómo elegir la forma precisa para las dimensiones arrolladas. Estas cuestiones requieren unos métodos no perturbativos más agudamente perfilados que aquellos de los que disponemos en la actualidad.

Lo que tenemos es una comprensión mucho más profunda de la estructura lógica y del alcance teórico de la teoría de cuerdas. Con anterioridad a los descubrimientos reflejados resumidamente en la Figura 12.11, el comportamiento relativo al acoplamiento fuerte en cada teoría de cuerdas era una caja negra, un completo misterio. Como en los antiguos mapas, el dominio del acoplamiento fuerte era un territorio inexplorado, potencialmente lleno de dragones y monstruos marinos. Pero ahora vemos que, aunque el viaje al acoplamiento fuerte nos puede llevar a atravesar regiones desconocidas de la Teoría-M, finalmente nos hace recalar en el cómodo ámbito del acoplamiento débil —aunque sea en el lenguaje dual de lo que en otro tiempo se consideró una teoría de cuerdas diferente—.

La dualidad y la Teoría-M unifican las cinco teorías de cuerdas y sugieren una conclusión importante. Es muy posible que no nos esperen otras sorpresas del calibre de las que acabamos de explicar. Una vez que el cartógrafo puede rellenar cada región del globo terráqueo, el mapa está hecho y los conocimientos geográficos están completos. Esto no quiere decir que las exploraciones de la Antártida o de alguna isla perdida de Micronesia no tengan un mérito cultural o científico. Tan sólo significa que la época de los grandes descubrimientos geográficos ha pasado. La ausencia de espacios en blanco en el globo terráqueo lo confirma. El «mapa de las teorías» que aparece en la Figura 12.11 es algo similar para los especialistas en teoría de cuerdas. Este mapa cubre toda la gama de teorías que se pueden conseguir partiendo de cualquiera de las cinco estructuras de cuerdas. Aunque estamos lejos de tener un conocimiento completo de la tierra desconocida en que se encuentra la Teoría-M, no

existen zonas del mapa que estén en blanco. Al igual que el cartógrafo, el especialista en teoría de cuerdas puede ahora afirmar con un cauteloso optimismo que el espectro de teorías lógicamente coherentes en el que figuran todos los descubrimientos esenciales del siglo pasado —la relatividad especial y la general; la mecánica cuántica; las teorías gauge de las fuerzas nuclear fuerte, nuclear débil y electromagnética; la supersimetría; las dimensiones adicionales de Kaluza y Klein— está completamente dibujado en la Figura 12.11.

El desafío que se les plantea a los especialistas en teoría de cuerdas —o quizá deberíamos decir a los especialistas en la Teoría-M— es demostrar que algún punto del mapa teórico de la Figura 12.11 describe realmente nuestro universo. Para llegar a hacer esto, es preciso hallar las ecuaciones completas y exactas cuya solución determinará ese punto escurridizo del mapa, y después comprender las propiedades físicas correspondientes con la precisión suficiente para permitimos realizar comparaciones con los resultados experimentales. Como Witten ha dicho: «El hecho de comprender qué es realmente la Teoría-M —las propiedades físicas que abarca— transformaría nuestro modo de comprender la naturaleza por lo menos tan radicalmente como lo hizo cualquiera de las revoluciones científicas importantes del pasado».[111] Éste es el programa para llegar a la unificación en el siglo XXI.

Agujeros Negros: Una perspectiva desde la teoría de cuerdas/Teoría-M

El conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica que se desató con anterioridad a la teoría de cuerdas fue una afrenta para nuestra idea visceral de que las leyes de la naturaleza han de encajar todas juntas en un todo coherente y homogéneo. Pero este antagonismo era algo más que una disyunción abstracta de alto nivel. Las condiciones físicas extremas que existieron en el momento del *big bang* y que se dan dentro de los agujeros negros *no pueden* entenderse sin una formulación de la fuerza gravitatoria en el marco de la mecánica cuántica. Gracias al descubrimiento de la teoría de cuerdas, tenemos ahora la esperanza de llegar a resolver estos profundos misterios. En este y en el próximo capítulo, explicamos hasta dónde han llegado los especialistas en teoría de cuerdas en su afán de comprender los agujeros negros y el origen del universo.

Agujeros negros y partículas elementales

A primera vista es difícil imaginarse dos cosas más radicalmente diferentes que los agujeros negros y las partículas elementales. Habitualmente describimos los agujeros negros como los cuerpos celestes más enormes y voraces, mientras que las partículas elementales son las pizcas de materia más diminutas que existen. Sin embargo, las investigaciones de unos cuantos físicos a finales de la década de 1960 y principios de la de 1970, entre los que estaban Demetrios Christodoulou, Werner Israel, Richard Price, Brandon Carter, Roy Kerr, David Robinson, Hawking y Penrose, demostraron que los agujeros negros y las partículas elementales no son quizá tan diferentes como se podría pensar. Estos físicos encontraron pruebas cada vez más convincentes de lo que John Wheeler ha resumido en la frase «los agujeros negros no tienen pelaje».

Con esto, Wheeler quería decir que, excepto por unas pocas características que los distinguen, todos los agujeros negros resultan parecidos. ¿Cuáles son esas características que los distinguen? Una de ellas, por supuesto, es la masa del agujero negro. ¿Cuáles son las demás? La investigación ha revelado que son la carga eléctrica y otras cargas de fuerza que un agujero negro puede transportar, así como la velocidad a la que gira. Y esto es todo. Cualquier par de agujeros negros que tengan la misma masa, las mismas cargas de fuerza y la misma velocidad de giro son completamente idénticos. Los agujeros negros no tienen «peinados» caprichosos —es decir, otras características intrínsecas— que los distingan uno del otro. Esto es un toque de atención. Recordemos que tales propiedades —masa, cargas de fuerza y espín— distinguen una partícula elemental de las otras. La similitud de los rasgos definitorios ha inducido a algunos físicos a lo largo de los años a la extraña especulación según la cual los agujeros negros podrían ser en realidad partículas elementales gigantescas.

De hecho, de acuerdo con la teoría de Einstein, no existe una masa mínima para los agujeros negros. Si comprimimos un pedazo de materia de cualquier masa hasta un tamaño suficientemente pequeño, una aplicación directa de la relatividad general nos muestra que se convertirá en un agujero negro. (Cuanto más ligera sea la masa, menor será el tamaño al que tenemos que comprimirla). Por lo tanto, podemos imaginarnos un experimento ficticio en el que comenzamos por tomar unas pizcas de materia cada vez más ligeras, las comprimimos hasta convertirlas en agujeros negros cada vez más pequeños, y comparamos las propiedades de esos agujeros negros resultantes con las propiedades de las partículas elementales. La aseveración de Witten sobre la carencia de pelaje nos lleva a la conclusión de que, para masas suficientemente pequeñas, los agujeros negros que formamos de esta manera se parecerán mucho a unas partículas elementales. Tendrán el aspecto de bultos diminutos que se caracterizan exclusivamente por su masa, sus cargas de fuerza y su espín.

Pero aquí hay una trampa. Los agujeros negros astrofísicos, cuyas masas son muchas veces la masa del Sol, son tan grandes y pesados que la aplicación de la mecánica cuántica es en gran manera irrelevante y sólo es necesario utilizar las fórmulas de la relatividad general para comprender sus propiedades. (Aquí estamos discutiendo la estructura general de los agujeros negros, no el punto central único del interior del agujero negro, en el que todo se colapsa y cuyo tamaño diminuto requiere ciertamente una descripción en el marco de la mecánica cuántica). Sin embargo, en la medida en que intentemos hacer cada vez menor la masa de los agujeros negros, se llega a un punto en que son tan ligeros y pequeños que la mecánica cuántica *entra en juego*. Esto sucede si la masa total del agujero negro es aproximadamente igual o menor que la masa de Planck. (Desde el punto de vista de la física de las partículas

elementales, la masa de Planck es enorme —unos diez trillones (10^{19}) de veces la masa de un protón—. Desde el punto de vista de los agujeros negros, sin embargo, la masa de Planck es pequeñísima, ya que viene a ser la que tiene por término medio una mota de polvo). De esta manera, los físicos que especulaban con la posibilidad de que los agujeros negros diminutos y las partículas elementales podrían estar estrechamente relacionados, chocaron inmediatamente con la incompatibilidad entre la relatividad general —la teoría fundamental aplicable a los agujeros negros— y la mecánica cuántica. En el pasado, esta incompatibilidad obstaculizó cualquier avance en esta intrigante dirección.

¿Nos permite la teoría de cuerdas ir más adelante?

Lo hace. Mediante una explicación sofisticada y totalmente inesperada de los agujeros negros, la teoría de cuerdas ofrece la primera conexión teóricamente bien fundada entre los agujeros negros y las partículas elementales. El camino hacia esta conexión da unos cuantos rodeos, pero nos lleva a través de algunos de los descubrimientos más interesantes de la teoría de cuerdas, haciendo que el viaje valga la pena.

Comienza con una cuestión aparentemente no relacionada con el tema, pero que los especialistas en teoría de cuerdas andaban barajando desde finales de la década de 1980. Los matemáticos y los físicos han sabido desde hace mucho tiempo que, cuando seis dimensiones espaciales se encuentran arrolladas en una forma de Calabi-Yau, existen en general dos tipos de esferas que están incrustadas dentro de la estructura de la forma. Uno de estos tipos de esferas es el de las esferas bidimensionales, como la superficie de un balón de playa, que desempeña un papel vital en las transiciones blandas con rasgado del espacio que vimos en el capítulo 11. El otro tipo lo forman unas esferas que son más difíciles de describir, pero son igualmente frecuentes. Se trata de las esferas tridimensionales —como las superficies de los balones de playa que adornan las arenosas costas oceánicas de un universo que tiene cuatro dimensiones espaciales extendidas—. Desde luego, como ya explicamos en el capítulo 11, un balón de playa corriente de nuestro mundo es en sí mismo un objeto tridimensional, pero su superficie, exactamente igual que la de una manguera de jardinería, es bidimensional: se necesita sólo dos números —latitud y longitud, por ejemplo— para situar cualquier posición sobre su superficie. Pero ahora nos vamos a imaginar que tenemos una dimensión espacial más: un balón de playa de cuatro dimensiones cuya superficie es tridimensional. Dado que es casi imposible ver con

nuestra imaginación un balón así, mayormente recurriremos a analogías de dimensión más reducida que se puedan visualizar más fácilmente. Sin embargo, como veremos a continuación, hay un aspecto de la naturaleza tridimensional de las superficies esféricas que es de una importancia primordial.

Estudiando las ecuaciones de la teoría de cuerdas, los físicos constataron que es posible, e incluso probable, que con el paso del tiempo estas esferas tridimensionales se reduzcan —se colapsen— hasta un volumen tan pequeño que se desvanece. Pero los especialistas en teoría de cuerdas se preguntaban qué sucedería si la estructura del espacio se colapsara de esta manera. ¿Se produciría algún efecto catastrófico debido a esta forma de comprimir la estructura espacial? Esto se parece mucho a la pregunta que planteamos y respondimos en el capítulo 11, pero aquí estamos hablando de esferas tridimensionales que se colapsan, mientras que en el capítulo 11 nos centrábamos exclusivamente en esferas bidimensionales que se colapsaban. (Como en el capítulo 11, dado que estamos considerando que un trozo de una forma de Calabi-Yau se está comprimiendo, y no toda la forma de Calabi-Yau completa, no es aplicable la identificación radio pequeño/radio grande que hacíamos en el capítulo 10). He aquí la diferencia cualitativa esencial que se origina a partir del cambio de dimensión.[112] Recordemos de lo visto en el capítulo 11 una constatación decisiva: que las cuerdas, cuando se desplazan a través del espacio, pueden cazar a lazo una esfera bidimensional. Es decir, su lámina universal bidimensional puede rodear completamente una esfera bidimensional, como se ve en la Figura 11.6. Esto demuestra ser justo la protección suficiente para impedir que una esfera bidimensional que se comprime y se colapsa ocasione catástrofes físicas. Pero ahora vamos a ver el caso del otro tipo de esfera que se encuentra en el interior de un espacio de Calabi-Yau, y esta otra esfera tiene demasiadas dimensiones para poder ser rodeada por una cuerda en movimiento. Si nos resulta difícil visualizar esto, es perfectamente correcto que pensemos en la analogía que se obtiene reduciendo en una unidad el número de dimensiones. Podemos imaginarnos las esferas tridimensionales como si fueran las superficies bidimensionales de las pelotas de playa normales, siempre que nos imaginemos las cuerdas unidimensionales como si fueran partículas puntuales de dimensión cero. Después, análogamente al hecho de que una partícula puntual de dimensión cero no puede echar el lazo a nada, y menos a una esfera bidimensional, tampoco una cuerda unidimensional puede echar el lazo a una esfera tridimensional.

Este razonamiento llevó a los especialistas en teoría de cuerdas a especular con la idea de que, si una esfera tridimensional situada dentro de un espacio de Calabi-Yau se colapsara (algo que las ecuaciones aproximadas demuestran que es perfectamente posible, y quizá la evolución normal en teoría de cuerdas), podría producirse como resultado un cataclismo. De hecho, las ecuaciones aproximadas de la teoría de

cuerdas que se hallaron con anterioridad a la mitad de la década de 1990 parecían indicar que el funcionamiento del universo se pararía lentamente y rechinando, si se produjera tal colapso; estas fórmulas indicaban que algunos de los infinitos que había conseguido domesticar la teoría de cuerdas volverían a su estado salvaje debido a la compresión de la estructura del espacio. Durante varios años, los especialistas en teoría de cuerdas tuvieron que convivir con esta situación, perturbadora aunque no concluyente, relativa a los conocimientos de que disponían. Pero en 1995, Andrew Strominger demostró que estas especulaciones catastrofistas eran erróneas.

Strominger, siguiendo las conclusiones de un innovador trabajo realizado anteriormente por Witten y Seiberg, utilizó la constatación de que la teoría de cuerdas, cuando se analiza con la nueva precisión aportada por la segunda revolución de las supercuerdas, no es sólo una teoría relativa a cuerdas unidimensionales. Strominger hizo el razonamiento que veremos a continuación. Una cuerda unidimensional —una unibrana, según el nuevo lenguaje de esta teoría— puede rodear completamente una porción unidimensional del espacio, como un círculo, según se ilustra en la Figura 13.1. (Obsérvese que esta Figura es diferente de la 11.6, en la que una cuerda unidimensional, mientras se desplazaba en el tiempo, echaba el lazo a una esfera bidimensional. La Figura 13.1 se debe considerar como una instantánea tomada en una fracción mínima de tiempo).

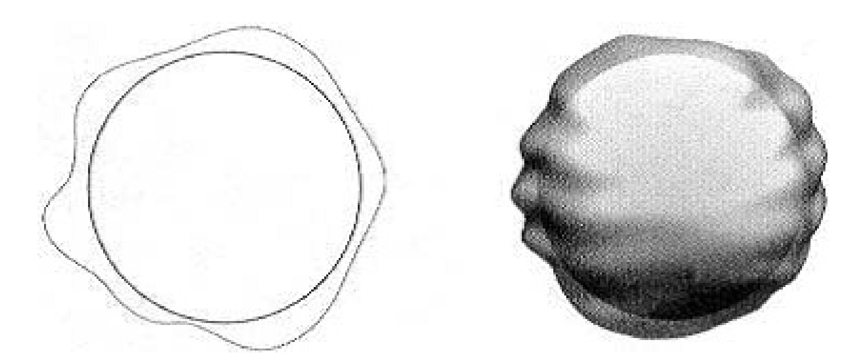


Figura 13.1 Una cuerda puede rodear un pedazo de la estructura espacial unidimensional y arrollado; una membrana bidimensional puede curvarse alrededor de un pedazo bidimensional.

De manera similar, en la Figura 13.1 vemos que una membrana bidimensional —una bibrana— puede envolver y cubrir completamente una esfera bidimensional, del mismo modo que un trozo de plástico puede envolver la superficie de una naranja ciñéndose a ella. Aunque es más difícil de visualizar, Strominger siguió esta pauta y constató que los ingredientes tridimensionales recién descubiertos en la teoría de cuerdas —las tribranas— pueden envolver y cubrir completamente una esfera tridimensional. Cuando ya tenía esta idea clara, Strominger demostró, mediante un sencillo cálculo físico estándar, que la tribrana envolvente proporciona un escudo hecho a medida que cancela exactamente todos los cataclismos que los especialistas en teoría de cuerdas habían temido anteriormente, como efectos potenciales, cuando

pensaban que dichos efectos ocurrirían al colapsarse una esfera tridimensional.

Este fue un maravilloso e importante descubrimiento. Pero todo su poder no fue revelado hasta poco tiempo después.

Rasgando la estructura del espacio (con convicción)

Una de las cosas más emocionantes de la física es que los conocimientos de que se dispone pueden cambiar literalmente de la noche a la mañana. Al día siguiente de que Strominger enviara su trabajo a través de un archivo electrónico de Internet, yo lo leí en mi despacho de Cornell después de haberlo recuperado del *World Wide Web*. De un solo golpe, Strominger había utilizado los nuevos y emocionantes descubrimientos de la teoría de cuerdas para resolver uno de los temas más peliagudos relacionados con el arrollamiento de las dimensiones adicionales en un espacio de Calabi-Yau. Sin embargo, mientras hacía la valoración de su publicación, me asaltó la idea de que Strominger podía haber desarrollado sólo la mitad de la historia.

En el trabajo anterior sobre la transición blanda con rasgado del espacio que se explicó en el capítulo 11, habíamos estudiado un proceso en dos fases en el que una esfera bidimensional se comprimía hasta reducirse a un punto, haciendo que la estructura del espacio se rasgara, y luego se volviera a inflar la esfera bidimensional de un modo distinto, reparando así el rasgado. En la publicación de Strominger, éste estudiaba lo que sucede cuando una esfera tridimensional se comprime reduciéndose a un punto y había demostrado que los objetos extendidos recién hallados en la teoría de cuerdas garantizan que la física sigue comportándose perfectamente bien. Pero en ese punto su publicación se terminaba. ¿Podría ser que existiera otra mitad de la historia en la que estuvieran incluidos, una vez más, el rasgado del espacio y su subsiguiente reparación inflando nuevamente las esferas?

Dave Morrison me estaba visitando en Cornell durante el trimestre de primavera de 1995 y aquella tarde nos reunimos para discutir la publicación de Strominger. En un par de horas teníamos ya hecho un esbozo del aspecto que podría tener la «segunda mitad de la historia». Recurriendo a algunas ideas descubiertas a finales de la década de 1980 por los matemáticos Herb Clemens de la Universidad de Utah, Robert Friedman de la Universidad de Columbia, y Miles Reid de la Universidad de Warwick, tal como las aplicaron Candelas, Green, y Tristan Hübsch, que entonces estaban en la Universidad de Texas en Austin, constatamos que, cuando una esfera tridimensional se colapsa, puede suceder que el espacio de Calabi-Yau se rasgue y posteriormente se repare a sí mismo volviendo a inflar la esfera. Pero surge una

sorpresa importante. Mientras que la esfera que se colapsa tiene tres dimensiones, la que se vuelve a inflar tiene sólo dos. Es difícil imaginarse cómo es esto, pero podemos hacernos una idea centrándonos en una analogía que tenga un número menor de dimensiones. En vez del caso tan difícil de representar de una esfera tridimensional que se colapsa y es reemplazada por una esfera bidimensional, imaginemos una esfera *unidimensional* que se colapsa y es sustituida por una esfera de dimensión cero.

En primer lugar, ¿qué son esferas de dimensión uno y cero? Bien, utilicemos las analogías para razonar. Una esfera bidimensional es el conjunto de puntos del espacio tridimensional que se encuentran a la misma distancia de un punto elegido como centro, tal como se muestra en la Figura 13.2 (a). Siguiendo la misma idea, una esfera unidimensional es el conjunto de puntos de un espacio bidimensional (la superficie de esta página, por ejemplo) que están a la misma distancia de un punto elegido como centro. Se puede ver en la Figura 13.2 (b), que esto no es sino una circunferencia. Finalmente, siguiendo la misma pauta, una esfera de dimensión cero es el conjunto de puntos de un espacio unidimensional (una línea) que se encuentran a la misma distancia de un punto elegido como centro. En la Figura 13.2 (c) se ve claramente que en total son dos puntos, siendo el «radio» de la esfera de dimensión cero igual a la distancia de cada punto al centro común.

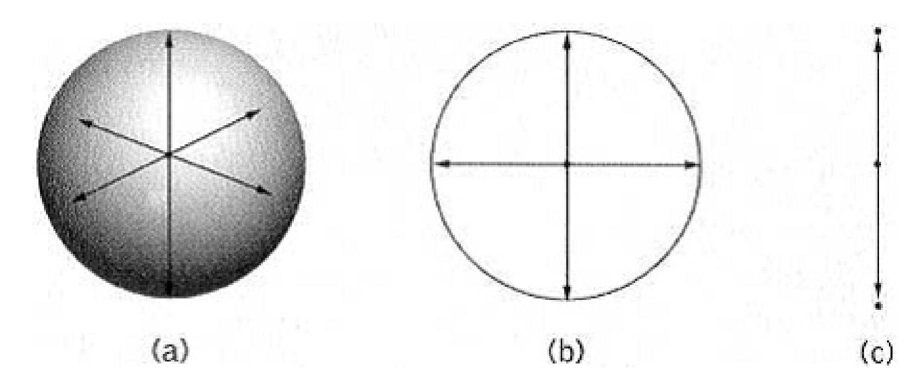


Figura 13.2 Esferas de dimensiones que pueden ser fácilmente visualizadas —aquellas de (a) dos, (b) una, y (c) cero dimensiones.

De esta manera, la analogía de dimensión inferior a la que se aludía en el párrafo anterior utiliza una circunferencia (una esfera unidimensional) que se comprime reduciéndose, con un rasgado del espacio a continuación, para ser luego reemplazada por una esfera de dimensión cero (dos puntos). La Figura 13.3 expresa de un modo práctico esta idea abstracta.

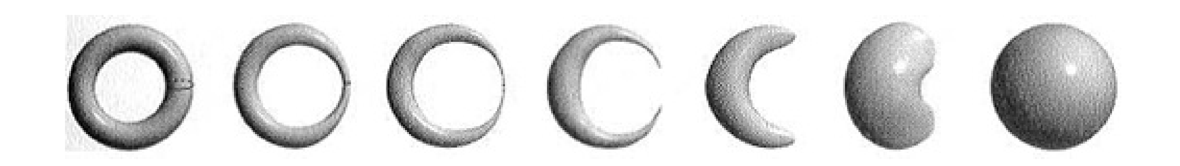


Figura 13.3 Un pedazo circular de una rosquilla (un toro) se colapsa en un punto. La superficie se abre rasgándose, produciendo dos agujeros puntuales. Una esfera de cero dimensiones (dos puntos) se «pega», remplazando la esfera original unidimensional (el círculo) y reparando la superficie rasgada. Esto permite la transformación a una forma completamente diferente —una pelota de playa—.

Nos imaginamos comenzando con la superficie de una rosquilla, en la que está incrustada una esfera unidimensional (una circunferencia), como aparece iluminado en la Figura 13.3. Después, supongamos que, con el paso del tiempo, la circunferencia allí dibujada se colapsa, produciendo una compresión en la estructura del espacio. Podemos reparar la compresión dejando que la estructura se rasgue momentáneamente, y luego sustituyendo la esfera unidimensional comprimida —la circunferencia que se ha colapsado— por una esfera de dimensión cero, es decir, dos puntos que taponan los agujeros producidos en la parte superior y en la parte inferior de la forma que surge a partir del rasgado. Como se muestra en la Figura 13.3, la forma resultante parece una banana alabeada, que a través de una suave deformación (sin rasgado del espacio) puede ser remodelada de manera continua hasta convertirse en la superficie de un balón de playa. Por consiguiente, vemos que, cuando una esfera unidimensional se colapsa y es sustituida por una esfera de dimensión cero, la topología de la rosquilla original, es decir, su forma fundamental, se altera radicalmente. En el contexto de las dimensiones espaciales arrolladas, la progresión con rasgado del espacio que se representa en la Figura 13.3 daría como resultado la evolución del universo que se dibuja en la Figura 8.8 hasta convertirse en el que se representa en la Figura 8.7.

Aunque ésta es una analogía con dimensiones inferiores, capta las características esenciales de lo que Morrison y yo habíamos previsto para la segunda mitad de la historia de Strominger. Después del colapso de una esfera tridimensional dentro de un espacio de Calabi-Yau, nos parecía que el espacio podía rasgarse y posteriormente reparar el rasgado haciendo crecer una esfera bidimensional, lo cual produciría unos cambios en la topología mucho más drásticos que lo que Witten y nosotros habíamos descubierto en un trabajo anterior (que se comentó en el capítulo 11). De esta manera, una forma de Calabi-Yau podía, en esencia, transformarse en una forma de Calabi-Yau completamente diferente —en un proceso muy parecido al de la rosquilla que se transforma en un balón de playa en la Figura 13.3— mientras que las propiedades físicas de las cuerdas permanecen perfectamente bien conservadas. Aunque empezaba a emerger una imagen de todo esto, sabíamos que existían aspectos significativos que necesitaríamos averiguar antes de que pudiéramos demostrar que nuestra segunda mitad de la historia no traía consigo ninguna peculiaridad —es decir, consecuencias perniciosas y físicamente inaceptables—. Nos fuimos a casa aquella noche sintiendo la alegría dudosa de estar ya trabajando sobre una nueva idea importante.

Una catarata de e-mails

La mañana siguiente recibí un correo electrónico de Strominger pidiéndome algún comentario o reacción acerca de su artículo. Mencionaba que «tendría que relacionarse de algún modo con el trabajo realizado por usted junto con Aspinwall y Morrison», porque resultaba que él también había estado explorando una posible conexión con el fenómeno del cambio de topología. Inmediatamente le envié un e-mail explicándole el bosquejo burdo al que habíamos llegado Morrison y yo. Cuando contestó, quedó claro que su nivel de emoción se correspondía con el que habíamos tenido Morrison y yo desde el día anterior.

Durante los días siguientes circuló una corriente continua de mensajes por e-mail entre nosotros tres, ya que estábamos intentando febrilmente establecer un rigor cuantitativo en que basar nuestra idea del cambio drástico en la topología resultante del rasgado del espacio. Lentos pero seguros, todos los detalles fueron encajando. El miércoles siguiente, una semana después de que Strominger comunicara por e-mail su idea inicial, teníamos hecho un borrador de una publicación conjunta en la que explicábamos la transformación radical de la estructura del espacio que se puede producir como consecuencia del colapso de una esfera tridimensional.

Strominger tenía previsto impartir un seminario en Harvard al día siguiente, por lo que se fue de Santa Bárbara a la mañana temprano. Acordamos que Morrison y yo continuaríamos ajustando el contenido de la publicación y luego, a la noche, lo remitiríamos al archivo electrónico. Para las 23:45, habíamos comprobado ya una y otra vez nuestros cálculos, todo parecía encajar perfectamente. En consecuencia, enviamos nuestro trabajo al archivo electrónico y salimos del edificio de Física. Cuando Morrison y yo nos dirigíamos andando hacia mi coche (yo le iba a llevar a la casa que él había alquilado para el trimestre) nuestra conversación giró hasta convertirse en un diálogo en el que hacíamos de abogados del diablo, imaginándonos la crítica más dura que podría hacernos alguien que estuviera decidido a no aceptar nuestros resultados. Cuando ya habíamos salido del aparcamiento y nos disponíamos a abandonar el campus, nos dimos cuenta de que, aunque nuestros argumentos eran firmes y convincentes, no eran del todo irrebatibles. Ninguno de los dos pensaba que hubiera alguna posibilidad de que nuestro trabajo tuviera errores, pero reconocíamos que la fuerza de nuestras alegaciones y los términos concretos que habíamos elegido para expresar algunas cuestiones podrían dejar la puerta abierta para un rencoroso debate, el cual podría oscurecer la importancia de los resultados. Estuvimos de acuerdo en que podría haber sido mejor que hubiéramos escrito el trabajo en un registro algo más humilde, disimulando la profundidad de sus afirmaciones, y permitiendo a los físicos que juzgaran el trabajo según su mérito, en vez de reaccionar contra la forma de su presentación.

Cuando íbamos por la carretera, Morrison me recordó que, según las reglas del archivo electrónico, podíamos revisar la publicación hasta las 2 de la madrugada, hora en que quedaría expuesto al acceso público a través de Internet. Inmediatamente di la vuelta con el coche y nos dirigimos de vuelta al edificio de Física, recuperamos el trabajo que habíamos enviado anteriormente y nos pusimos a trabajar bajando el tono de la prosa utilizada. Afortunadamente, hacer esto resultaba bastante fácil. Unos pocos cambios de palabras en los párrafos cruciales suavizaron el tono de nuestras afirmaciones, sin comprometer el contenido técnico. Al cabo de una hora, remitimos de nuevo la publicación y acordamos no volver a hablar de ello durante todo el camino hasta la casa de Morrison.

Poco después del mediodía del día siguiente, era evidente que la respuesta a nuestra publicación era entusiasta. Entre las muchas respuestas que recibimos por e-mail había una de Plesser, que nos dedicó uno de los cumplidos más elogiosos que un físico puede dedicar a otro, declarando: «¡Me gustaría haber sido yo el que hubiera tenido la idea!». A pesar de nuestros temores de la noche anterior, habíamos convencido a los especialistas en teoría de cuerdas de que la estructura del espacio, no sólo puede sufrir los suaves rasgados descubiertos con anterioridad (capítulo 11), sino que también pueden producirse desgarrones más drásticos, como el que se representa de una manera aproximada en la Figura 13.3.

Volviendo a los agujeros negros y las partículas elementales

¿Qué tiene que ver todo esto con los agujeros negros y las partículas elementales? Mucho. Para verlo, debemos plantearnos la misma pregunta que planteábamos en el capítulo 11. ¿Cuáles son las consecuencias físicas observables de esos rasgados de la estructura del espacio? En el caso de las transiciones blandas, como ya hemos visto, la sorprendente respuesta a esta pregunta es que no hay ninguna consecuencia importante. Pero, en el caso de las transiciones de *plegado cónico* —el nombre técnico con que se designan las transiciones drásticas con rasgado del espacio que ahora hemos descubierto— no se produce, una vez más, ninguna catástrofe física (al contrario de lo que sucedería en la relatividad general convencional), pero existen unas consecuencias observables más pronunciadas.

Hay dos nociones relacionadas subyacentes a estas consecuencias observables; los explicaremos de uno en uno. En primer lugar, como ya hemos comentado, el paso hacia adelante que dio inicialmente Strominger fue la constatación de que una esfera tridimensional situada en el interior de un espacio de Calabi-Yau puede colapsarse sin

que se produzca como consecuencia un desastre, porque una tribrana que envuelve dicha esfera constituye un perfecto escudo protector. Pero ¿qué aspecto tiene la configuración de esta membrana envolvente? La respuesta se halla en un trabajo anterior de Horowitz y Strominger, que demuestra que, para personas como nosotros que sólo conocemos directamente las tres dimensiones espaciales extendidas, la tribrana que está «untada» en la esfera tridimensional, rodeándola, establecerá un campo gravitatorio parecido al de un agujero negro.[113] Esto *no* resulta obvio y sólo se ve claro a partir de un estudio detallado de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las branas. Una vez más, resulta difícil dibujar con precisión tales configuraciones de dimensiones superiores en una página, pero la Figura 13.4 representa una idea aproximada mediante una analogía de dimensión inferior en la que intervienen dos esferas bidimensionales. Vemos que una membrana bidimensional puede untarse a una esfera bidimensional rodeándola (una esfera que se encuentra a su vez dentro de un espacio de Calabi-Yau situado en alguna ubicación relativa a las dimensiones extendidas).

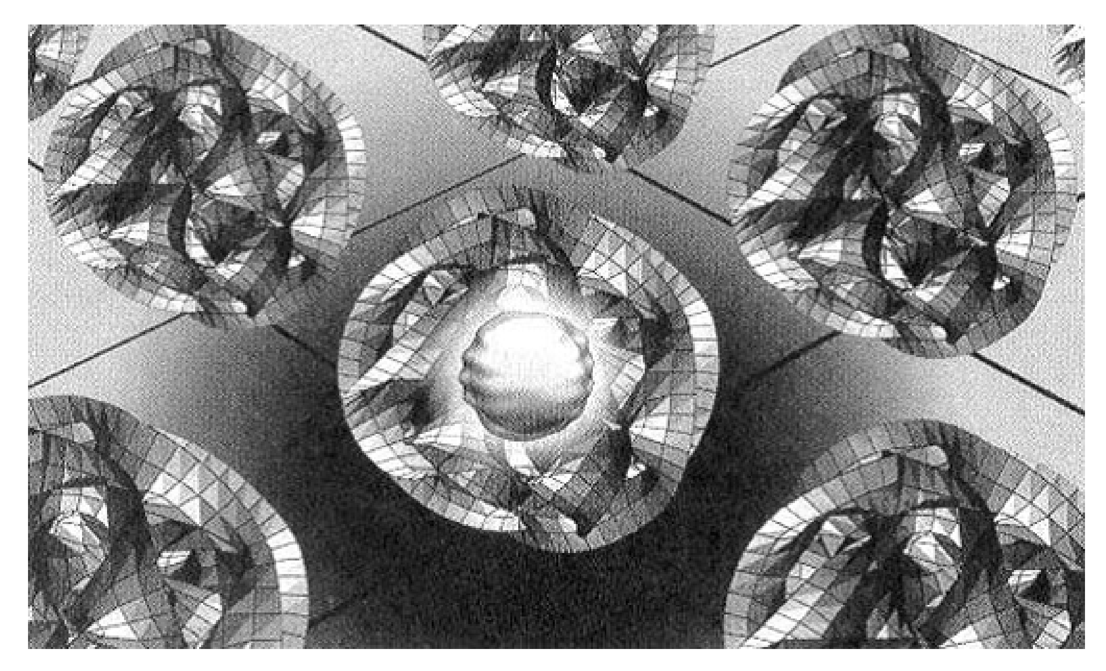


Figura 13.4 Cuando una brana se curva alrededor de una esfera que está dentro de la dimensión arrollada, tiene el aspecto de un agujero negro en las dimensiones extendidas familiares.

Alguien que mirara a través de las dimensiones extendidas hacia esta ubicación percibiría la membrana curvada por su masa y por las cargas de fuerza que transporta, propiedades que, según habían demostrado Horowitz y Strominger, serían como las de un agujero negro. Además, en la innovadora publicación de Strominger de 1995, éste argumentaba que la masa de la tribrana —es decir, la masa del agujero negro— es proporcional al volumen de la esfera tridimensional a la que envuelve: cuanto mayor es el volumen de la esfera, mayor debe ser la tribrana para poder envolverla, y por lo tanto tendrá más masa. De una manera similar, cuanto menor sea el volumen

de la esfera, menor será la masa de la tribrana que la envuelve. Luego, a medida que esta esfera se va colapsando, la tribrana que la envuelve, que se percibe como un agujero negro, se vuelve cada vez más ligera. Cuando la esfera tridimensional se ha colapsado hasta reducirse a un punto comprimido, el agujero negro correspondiente —prepárese para la sorpresa— no tiene masa. Aunque parece un absoluto misterio —¿qué demonios es un agujero negro *sin masa*?— pronto relacionaremos este enigma con la física de cuerdas que nos resulta más familiar.

El segundo ingrediente que tenemos que recordar es que el número de agujeros de una forma de Calabi-Yau, como se dijo en el capítulo 9, determina el número de patrones de cuerdas vibratorias con baja energía, y por lo tanto con masa pequeña, es decir, los patrones que posiblemente explican la naturaleza de las partículas de la Tabla 1.1 y también los constituyentes que transportan las fuerzas. Dado que las transiciones de plegado cónico con rasgado del espacio modifican el número de agujeros (como, por ejemplo, en la Figura 13.3, en la que el agujero de la rosquilla queda eliminado en el proceso de rasgado y reparación), esperamos un cambio en el número de patrones vibratorios con masas pequeñas. De hecho, cuando Morrison, Strominger y yo hicimos un estudio detallado de esta cuestión, descubrimos que, cuando una nueva esfera bidimensional sustituye a la esfera tridimensional comprimida en las dimensiones arrolladas de Calabi-Yau, el número de patrones vibratorios de cuerdas sin masa aumenta exactamente en una unidad. (El ejemplo de la rosquilla que se convierte en un balón de playa, según la Figura 13.3, nos podría hacer creer que el número de agujeros —y por consiguiente el número de modelos— disminuye, pero esto resulta ser una propiedad engañosa de la analogía planteada con un número inferior de dimensiones).

Para combinar las observaciones de los dos párrafos anteriores, imaginemos una secuencia de instantáneas de un espacio de Calabi-Yau en el que el tamaño de una esfera tridimensional concreta se hace cada vez más pequeño. La primera observación implica que una tribrana que envuelve a esta esfera tridimensional —que se nos presenta como un agujero negro— tendrá una masa cada vez más pequeña hasta que, en el punto final del colapso, será una tribrana sin masa. Pero, volviendo a la pregunta anterior, ¿qué significa esto? Vemos clara la respuesta apelando a la segunda observación. Nuestro trabajo demostraba que el nuevo patrón de vibración de cuerdas, carente de masa, que surgía de la transición de plegado cónico con rasgado del espacio, es *la descripción microscópica de la partícula carente de masa en que se ha convertido el agujero negro*. Llegamos a la conclusión de que, cuando una forma de Calabi-Yau experimenta una transición de plegado cónico con rasgado del espacio, hay un agujero negro, inicialmente provisto de masa, que se vuelve cada vez más ligero hasta que se queda sin masa y entonces se transmuta en una partícula sin masa —tal como un fotón sin masa— que en la teoría de cuerdas no es sino una

cuerda única que ejecuta un patrón vibratorio particular. De este modo, por primera vez, la teoría de cuerdas establece explícitamente una relación directa, concreta y cuantitativamente inatacable, entre los agujeros negros y las partículas elementales.

«Derritiendo» agujeros negros

La relación entre agujeros negros y partículas elementales que encontramos se parece mucho a algo que todos estamos acostumbrados a percibir en la vida cotidiana y que técnicamente se conoce como transición de fase. Un ejemplo sencillo de transición de fase es una que ya mencionamos en el capítulo anterior: el agua puede existir como sólido (hielo), como líquido (agua líquida), y como gas (vapor). Son lo que llamamos las *fases* del agua, y la transformación de una a otra se denomina *transición de fase*. Morrison, Strominger y yo demostramos que existe una estrecha analogía matemática y física entre estas transiciones de fase y las transiciones de plegado cónico con rasgado del espacio que hacen que una forma de Calabi-Yau se convierta en otra. Una vez más, del mismo modo que una persona que nunca antes ha visto hielo o agua líquida no reconoce inmediatamente que se trata de dos fases de la misma sustancia subyacente, los físicos no se habían dado cuenta anteriormente de que los tipos de agujeros negros que estábamos estudiando y las partículas elementales eran en realidad dos fases del mismo material de cuerdas. Mientras que es la temperatura exterior la que determina la fase en la cual se encuentra el agua, la forma topológica de las dimensiones adicionales de Calabi-Yau determina si ciertas configuraciones físicas de la teoría de cuerdas se presentan como agujeros negros o como partículas elementales. Es decir, en la primera fase, la forma inicial de Calabi-Yau (el equivalente en la analogía a la fase del hielo, por ejemplo), nos encontramos con que están presentes ciertos agujeros negros. En la segunda fase, la segunda forma de Calabi-Yau (el equivalente en la analogía a la fase líquida del agua), estos agujeros negros han sufrido una transición de fase —se han «derretido», por decirlo así— convirtiéndose en patrones de cuerdas vibratorios fundamentales. El rasgado del espacio durante las transiciones de plegado cónico nos lleva de una fase de Calabi-Yau a otra. En este proceso, vemos que los agujeros negros y las partículas elementales, como el hielo y el agua, son dos caras de la misma moneda. Constatamos así que los agujeros negros encajan cómodamente en el marco de la teoría de cuerdas.

Hemos utilizado a propósito la misma analogía del agua para estas transmutaciones drásticas con rasgado del espacio y para las transmutaciones de una

de las cinco formulaciones de la teoría de cuerdas en otra (capítulo 12) porque están estrechamente relacionadas. Recordemos que mediante la Figura 12.11 habíamos expresado que las cinco teorías son duales la una con respecto a la otra y, por lo tanto, están unificadas bajo la rúbrica de una única teoría que abarca todo. Pero ¿persiste la posibilidad de movernos continuamente de una descripción a otra —partir de cualquier punto del mapa de la Figura 12.11 y llegar a cualquier otro— incluso después de dejar que las dimensiones adicionales se enrollen dentro de una u otra forma de Calabi-Yau? Antes del descubrimiento de esos resultados drásticos derivados de los cambios de topología, la respuesta era no, ya que no se conocía ningún modo de deformar de manera continua una forma de Calabi-Yau hasta convertirla en otra. Sin embargo, ahora vemos que la respuesta es sí: mediante estas transiciones, físicamente coherentes, de plegado cónico con rasgado del espacio, podemos modificar de manera continua cualquier espacio de Calabi-Yau hasta convertirlo en otro. Si hacemos variar las constantes de acoplamiento y la geometría de dimensiones arrolladas de Calabi-Yau, vemos que todas las construcciones teóricas relativas a cuerdas son, una vez más, fases diferentes de una única teoría. Incluso después de realizar el arrollado de todas las dimensiones adicionales, la unidad de la Figura 12.11 se mantiene firmemente.

Entropía de los agujeros negros

Durante muchos años, algunos de los físicos teóricos más competentes estuvieron especulando sobre la posibilidad de que existieran los procesos con rasgado del espacio y también una relación entre los agujeros negros y las partículas elementales. Aunque estas especulaciones podían sonar al principio a ciencia ficción, el descubrimiento de la teoría de cuerdas, con su capacidad para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, nos ha permitido ahora situar firmemente esas posibilidades en el puesto más avanzado de la ciencia de vanguardia. Este éxito nos anima a preguntar si alguna de esas otras propiedades misteriosas de nuestro universo, que se han resistido pertinazmente a ser resueltas durante décadas, podrían ahora sucumbir también ante los poderes de la teoría de cuerdas. Ante todo, entre esas propiedades está el concepto de *entropía de los agujeros negros*. Éste es el campo en el que la teoría de cuerdas ha hecho mayores alardes de poder, resolviendo con éxito un problema de enorme importancia planteado hace ya un cuarto de siglo.

La entropía es una medida del desorden o de la aleatoriedad. Por ejemplo, si la mesa de trabajo está llena de pisos y más pisos de libros abiertos, artículos a medio

leer, periódicos viejos y folletos de propaganda, se puede decir que se encuentra en un estado de gran desorden o de *alta entropía*. Al contrario, si está perfectamente ordenada, con los artículos en carpetas ordenadas por orden alfabético, periódicos apilados en orden cronológico, libros ordenados alfabéticamente por autores, y bolígrafos y rotuladores colocados en sus botes correspondientes, la mesa se encuentra en un estado de mucho orden o, lo que es equivalente, de *baja entropía*. Este ejemplo ilustra la idea esencial, pero los físicos han formulado una definición perfectamente cuantitativa de la entropía que permite especificar la entropía de un objeto utilizando un valor numérico determinado: cuanto mayor es ese número, mayor es la entropía; si el número es menor, significa una entropía menor. Aunque los detalles son un poco complicados, este número, dicho de una forma sencilla, indica los posibles reordenamientos de los componentes de un sistema físico, dado que dejan su apariencia general intacta. Cuando la mesa de trabajo está limpia y ordenada, prácticamente cualquier reordenamiento que hagamos —cambiar el orden de los periódicos, libros o artículos, sacar algún bolígrafo de su bote— perturbará su altamente ordenada organización. Esto quiere decir que la mesa tiene una baja entropía. Por el contrario, si la mesa está hecha un desastre, el realizar numerosos cambios en la organización de los periódicos, los artículos y los folletos de propaganda dejaría casi siempre el mismo o parecido desorden y, por lo tanto, no perturbaría su aspecto general. Esto quiere decir que tiene una alta entropía.

Por supuesto que una explicación basada en reordenamientos de libros, artículos y periódicos en la superficie de una mesa —y determinar qué remodelaciones «dejan el aspecto general intacto»— carece de precisión científica. La definición rigurosa de entropía implica en realidad hacer el recuento o el cálculo del número de posibles reordenamientos de las microscópicas propiedades mecánico-cuánticas que tienen los componentes elementales de un sistema físico y que no afectan a sus grandes propiedades macroscópicas (tales como su energía o su presión). Los detalles no son esenciales, siempre y cuando nos demos cuenta de que la entropía es un concepto mecánico— cuántico totalmente cuantitativo que mide con precisión el desorden general de un sistema físico.

En 1970, Jacob Bekenstein, que entonces era un estudiante graduado, alumno de John Wheeler en Princeton, planteó una audaz sugerencia. Se trataba de la extraordinaria idea de que los agujeros negros podrían tener entropía, y además en gran cantidad. A Bekenstein le había motivado la venerable y bien comprobada *segunda ley de la termodinámica*, que afirma que la entropía de un sistema siempre aumenta: todo tiende a un desorden mayor. Aunque se ordene esa mesa de trabajo tan desordenada, disminuyendo así su entropía, en realidad la entropía total, incluida la de nuestros cuerpos y la del aire que hay en la habitación, aumenta. Para ordenar la mesa se ha de gastar energía; el que la ordena ha de desorganizar algunas de las

ordenadas moléculas de grasa de su cuerpo para generar la energía que utilizarán los músculos y, mientras se ordena, el cuerpo emite calor, el cual hace que las moléculas del aire que hay en el ambiente pasen a un estado de mayor agitación y desorden. Cuando se tienen en cuenta todos estos efectos, resulta que compensan con creces la disminución de entropía de la mesa, y por consiguiente la entropía total aumenta.

Pero Bekenstein se preguntaba: ¿qué sucede si se ordena la mesa cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro y se instala una bomba de vacío para que absorba todas las moléculas de aire que han empezado a agitarse en la habitación y las envíe a las desconocidas profundidades del interior del agujero negro? Podemos ser incluso más exagerados: ¿qué pasaría si la bomba de vacío absorbe todo el aire, y todo lo que hay en la mesa, e incluso la propia mesa, enviándolo al agujero negro, y dejando una fría habitación sin aire y perfectamente ordenada? Puesto que la entropía de la habitación ciertamente ha disminuido, Bekenstein deducía que el único modo de cumplir la segunda ley de la termodinámica sería que el agujero negro tuviera entropía, y que esta entropía aumentara suficientemente cuando la materia se bombea al interior del agujero, con el fin de compensar la pérdida de entropía observada en el exterior del agujero negro.

De hecho, Bekenstein pudo recurrir a un famoso descubrimiento de Stephen Hawking para respaldar su propuesta. Hawking había demostrado que el área del horizonte de sucesos de un agujero negro —recuérdese que este horizonte es la superficie de no retorno que envuelve a cualquier agujero negro— siempre aumenta cuando se produce cualquier interacción física. Hawking demostró que, si un asteroide cae en un agujero negro o si parte del gas de la superficie de una estrella cercana se une al agujero negro, o si dos agujeros negros chocan y se combinan entre sí, en todos estos procesos y también en todos los demás, el área total del horizonte de sucesos del agujero negro siempre aumenta. Para Bekenstein, la evolución inexorable hacia una mayor entropía total induce a pensar en una relación con la inexorable evolución a una entropía total mayor que se menciona en la segunda ley de la termodinámica. Formuló la hipótesis de que el área del horizonte de sucesos de un agujero negro proporciona una medida exacta de su entropía.

Sin embargo, examinando todo esto más detenidamente, hay dos razones por las que la mayoría de los físicos pensaron que la idea de Bekenstein podía no ser correcta. En primer lugar, los agujeros negros parecen estar entre los objetos más ordenados y organizados de todo el universo. Una vez que se mide la masa de un agujero negro, las cargas de fuerza que transporta y su espín, la identidad de dicho agujero negro queda determinada con toda precisión. Con unas características definitorias tan escasas, parece como si a un agujero negro le faltara la estructura suficiente para que pudiera haber desorden en él. Del mismo modo que parecen pocos los estragos que se podrían causar en una mesa de trabajo sobre la que hubiera tan

sólo un libro y un lápiz, los agujeros negros parecen demasiado sencillos como para poder tener desorden. La segunda razón por la que la propuesta de Bekenstein era difícil de aceptar, era que la entropía, como ya hemos comentado aquí, es un concepto del marco de la mecánica cuántica, mientras que los agujeros negros, hasta hace poco, estaban firmemente atrincherados en el campo contrario, es decir, en la relatividad general. A principios de la década de 1970, sin que hubiera ningún modo de fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, parecía cuanto menos inapropiado discutir la posible entropía de los agujeros negros.

¿Cómo de negro es lo negro?

Parece ser que también Hawking había pensado en la analogía entre su ley del aumento de la superficie exterior de un agujero negro y la ley del inevitable aumento de la entropía, pero descartó esta analogía pensando que era sólo una coincidencia. Hawking, basándose en su ley del incremento del área y en otros descubrimientos realizados junto con James Bardeen y Brandon Carter, afirmó que, después de todo, si uno se tomaba en serio la analogía entre las leyes de los agujeros negros y las leyes de la termodinámica, estaría obligado no sólo a identificar el área del horizonte de sucesos del agujero negro con su entropía, sino también a asignar una *temperatura* al agujero negro (con un valor exacto determinado por la fuerza del campo gravitatorio del agujero negro en su horizonte de sucesos). Pero, si un agujero negro tiene una temperatura distinta de cero —independientemente de lo baja que pueda ser— los principios físicos más básicos y sólidamente establecidos *exigirían* que el agujero emitiera una radiación, como lo hace un atizador de hierro incandescente. Sin embargo, los agujeros negros, como todo el mundo sabe, son negros; se supone que no emiten nada. Hawking y casi todos los demás coincidían en que esto descartaba definitivamente la sugerencia de Bekenstein. Por otro lado, Hawking estaba dispuesto a aceptar que, si un pedazo de materia que posee entropía se arroja al interior de un agujero negro, esta entropía se pierde, lisa y llanamente. Lo sentimos por la segunda ley de la termodinámica.

Así estaban las cosas hasta que Hawking, en 1974, descubrió algo verdaderamente sorprendente. Los agujeros negros, anunció Hawking, *no* son completamente negros. Si ignoramos la mecánica cuántica y recurrimos solamente a las leyes de la relatividad general clásica, entonces, como se había descubierto más o menos seis décadas antes, los agujeros negros ciertamente no permiten que nada —ni siquiera la luz— se escape de su atracción gravitatoria. Pero la inclusión de la

mecánica cuántica modifica esta conclusión de un modo profundo. Aunque no obraba en su poder una versión mecánico-cuántica de la relatividad general, Hawking pudo apañárselas para conseguir una unión parcial de estas dos herramientas teóricas que le diera unos resultados limitados, pero fiables. El más importante descubrimiento que realizó como consecuencia de esto, fue que los agujeros negros *sí* emiten una radiación, en los términos de la mecánica cuántica.

Los cálculos son largos y arduos, pero la idea básica de Hawking es sencilla. Hemos visto que el principio de incertidumbre asegura que incluso el espacio vacío es un frenesí enervante y hormigueante de partículas virtuales que surgen y, a continuación, se aniquilan unas a otras. Este comportamiento cuántico frenético se produce también en la región del espacio que queda justo fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro. No obstante, Hawking constató que el poder gravitatorio de un agujero negro puede inyectar energía, por ejemplo, a un par de fotones virtuales y esta energía puede hacer que estos fotones se repelan alejándose el uno del otro lo suficiente como para que uno de ellos sea absorbido por el agujero negro. Una vez que su compañero ha desaparecido en el abismo del agujero, el otro fotón de este par no tiene ya un acompañante que lo aniquile. Hawking demostró que, en vez de eso, el fotón que permanece recibe un impulso energético procedente de la fuerza gravitatoria del agujero negro y así, cuando su compañero cae hacia el interior, él se ve disparado hacia fuera, alejándose del agujero negro. Hawking se dio cuenta de que para alguien que esté observando el agujero negro desde la seguridad que ofrece la distancia, el efecto combinado de este alejamiento mutuo de los fotones virtuales que formaban un par, alejamiento que se produce una y otra vez en el entorno del horizonte del agujero negro, da la impresión de que se está produciendo una corriente continua de radiación saliente. Los agujeros negros se ponen *incandescentes*.

Además, Hawking pudo calcular la temperatura que un observador distante asignaría a la radiación emitida y descubrió que viene dada por la fuerza que tiene el campo gravitatorio en el horizonte del agujero negro, exactamente lo que sugería la analogía entre las leyes de la física de los agujeros negros y las leyes de la termodinámica.[114] Bekenstein tenía razón: los descubrimientos de Hawking demostraron que la analogía debía ser tomada seriamente. De hecho, estos descubrimientos dejaban claro que es mucho más que una analogía: se trata de una *identidad*. Un agujero negro tiene entropía. Un agujero negro tiene temperatura. Y las leyes gravitatorias de la física del agujero negro no son sino una reescritura de las leyes de la termodinámica en un contexto gravitatorio extraordinariamente especial. Ésta fue la bomba que dejó caer Hawking en 1974.

Para hacernos una idea de las escalas involucradas, queda claro que cuando se hace cuidadosamente el recuento de todos los detalles, un agujero negro cuya masa

sea alrededor de tres veces la del Sol tiene una temperatura de aproximadamente una cienmillonésima de grado sobre el cero absoluto. No es cero, pero por muy poco. Los agujeros negros no son negros, pero les falta poquísimo para serlo. Esto hace que, por desgracia, la radiación emitida por un agujero negro sea muy exigua y, por lo tanto, imposible de detectar experimentalmente. Sin embargo, hay una excepción. Los cálculos de Hawking demostraron también que cuanta menos masa tiene un agujero negro, más elevada es su temperatura y más intensa la radiación que emite. Por ejemplo, un agujero negro tan ligero como un pequeño asteroide emitiría más o menos la radiación que emite una bomba de hidrógeno de un millón de megatones, estando concentrada la radiación en la parte del espectro electromagnético que corresponde a los rayos gamma. Los astrónomos han explorado el cielo nocturno buscando esta radiación, pero, salvo en unas pocas posibilidades a larga distancia, han terminado con las manos vacías. Esto indica probablemente que esos agujeros negros con poca masa, en caso de existir, son muy escasos.[115] Como dice Hawking a menudo, bromeando, esto es malo, ya que si se detectara la radiación de los agujeros negros que sus trabajos predicen, él ganaría sin lugar a dudas el premio Nobel.[116]

En contraste con su bajísima temperatura en fracciones de millonésima de grado, cuando se calcula la entropía de, por ejemplo, un agujero negro cuya masa es tres veces la del Sol, el resultado es un número enorme: un uno seguido de ¡unos 78 ceros! Y, cuanto mayor es la masa de un agujero negro, mayor es su entropía. El éxito de los cálculos de Hawking demostró de manera inequívoca que esto refleja verdaderamente la enorme cantidad de desorden que contiene un agujero negro.

Pero ¿desorden de qué? Como hemos visto, los agujeros negros parecen ser unos objetos terriblemente simples. Entonces, ¿cuál es la fuente de este abrumador desorden? A este respecto, los cálculos de Hawking no decían nada. Su fusión parcial de la relatividad general y la mecánica cuántica se podía utilizar para hallar el valor numérico de la entropía de un agujero negro, pero no ofrecía una explicación de su significado microscópico. Durante casi un cuarto de siglo, algunos de los físicos más notables intentaron comprender cuáles de las posibles propiedades microscópicas de los agujeros negros podían causar su entropía. No obstante, sin una fusión completamente fiable de la mecánica cuántica y la relatividad general, se ha podido vislumbrar parcialmente alguna respuesta, pero el misterio sigue sin resolverse.

Entremos en la teoría de cuerdas

O, más bien estuvo sin resolverse hasta enero de 1996, cuando Strominger y Vafa —

trabajando sobre unos descubrimientos anteriores realizados por Susskind y Sen— remitieron al archivo electrónico de física una publicación titulada «Origen microscópico de la entropía de Bekenstein-Hawking». En este trabajo, Strominger y Vafa lograron utilizar la teoría de cuerdas para identificar los componentes microscópicos de cierta clase de agujeros negros y para calcular exactamente la entropía asociada a estos agujeros. Su trabajo se basaba en un sistema recién descubierto para rodear parcialmente las aproximaciones perturbativas que se utilizaban durante la década de 1980 y principios de la de 1990, y el resultado que obtuvieron coincidía exactamente con el que habían predicho Bekenstein y Hawking, completando así finalmente una imagen pintada parcialmente hacía más de veinte años.

Strominger y Vafa se centraron en el tipo de los llamados agujeros negros *extremados*. Se trata de agujeros negros provistos de carga —podemos imaginarla como carga eléctrica— y que, además, tienen la masa mínima posible que sea coherente con la carga que transportan. Como se puede ver a partir de esta definición, están estrechamente relacionados con los estados BPS, de los que ya hemos hablado en el capítulo 12. De hecho, Strominger y Vafa aprovecharon esta similitud hasta sus últimas consecuencias. Demostraron que podrían construir —teóricamente, por supuesto— ciertos agujeros negros extremados partiendo de un conjunto concreto de branas BPS (de determinadas dimensiones específicas) y uniéndolas según un planteamiento matemático preciso. Casi del mismo modo que se puede construir un átomo, también teóricamente, partiendo de un lote de quarks y electrones, y luego ordenándolos con precisión en protones y neutrones, rodeados de electrones que orbitan alrededor, Strominger y Vafa demostraron cómo algunos de los constituyentes recién descubiertos en la teoría de cuerdas podían remodelarse de un modo similar uniéndolos para producir unos agujeros negros de un tipo determinado.

En realidad, los agujeros negros son un posible producto final de la evolución de las estrellas. Después de que una estrella ha quemado todo su combustible nuclear durante miles de millones de años de fusión atómica, no tiene ya la fuerza necesaria —la presión dirigida hacia el exterior— para resistir la enorme fuerza gravitatoria que se dirige hacia adentro. Si se da un amplio espectro de condiciones, esto acaba en un cataclismo consistente en la implosión de la enorme masa de la estrella; ésta se colapsa violentamente por el efecto de su tremendo peso, formando así un agujero negro. En contra de esta manera realista de formación, Strominger y Vafa abogaban por los agujeros negros «de diseño». Hicieron que cambiaran las tornas en lo relativo a la formación de los agujeros negros, demostrando que se podían construir sistemáticamente —en la imaginación de un teórico— tejiendo juntas lentamente, cuidadosamente y meticulosamente, una combinación precisa de las branas que habían nacido con la segunda revolución de las supercuerdas.

La fuerza de este planteamiento quedó clara inmediatamente. Manteniendo un control teórico total sobre la construcción microscópica de sus agujeros negros, Strominger y Vafa podían contar con facilidad y directamente el número de reordenaciones de los constituyentes microscópicos del agujero negro que dejarían todas sus propiedades observables, su masa y sus cargas de fuerza, invariables. A continuación podrían comparar este número con el área del horizonte del agujero negro —la entropía que predijeron Bekenstein y Hawking—. Cuando Strominger y Vafa hicieron esto, descubrieron que todo concordaba perfectamente. Al menos en el caso de los agujeros negros extremados, habían logrado utilizar la teoría de cuerdas para dar cuenta de una manera precisa de los constituyentes microscópicos y la entropía asociada. Se había resuelto un rompecabezas que llevaba un cuarto de siglo pendiente de solución.[117]

Muchos especialistas en teoría de cuerdas vieron en este éxito una prueba importante y convincente que apoyaba la teoría. Nuestros conocimientos sobre teoría de cuerdas son aún demasiado burdos como para poder entrar en contacto directo y preciso con observaciones experimentales relativas a, por ejemplo, la masa de un quark o de un electrón. Pero ahora vemos que la teoría de cuerdas ha aportado la primera explicación fundamental de una propiedad de los agujeros negros que ha tenido perplejos durante años a los físicos que utilizaban teorías más convencionales. Esta propiedad de los agujeros negros está estrechamente ligada a la predicción de Hawking según la cual estos debían emitir radiaciones, una predicción que, en principio, debería ser medible experimentalmente. Desde luego, esto requiere que descubramos definitivamente un agujero negro en los cielos y luego construyamos unos instrumentos que sean lo bastante sensibles como para detectar la radiación que emite. Si el agujero negro fuera lo suficientemente ligero, este último paso estaría al alcance de la tecnología actual. Aunque este programa experimental todavía no ha tenido éxito, sirve para enfatizar de nuevo que se pueden tender puentes sobre el abismo que separa a la teoría de cuerdas de los postulados físicos definitivos acerca del mundo natural. Incluso Sheldon Glashow —el archirival de la teoría de cuerdas durante la década de 1980— ha dicho recientemente, «cuando los especialistas en teoría de cuerdas hablan sobre agujeros negros, están casi hablando sobre fenómenos observables, y esto es impresionante».[118]

Los misterios remanentes de los agujeros negros

Incluso con estos impresionantes descubrimientos, aún existen dos misterios

fundamentales relativos a los agujeros negros. El primero se refiere al impacto que los agujeros negros producen en el concepto de determinismo. A comienzos del siglo XIX el matemático francés Pierre-Simon de Laplace, siguiendo las leyes del movimiento de Newton, enunció la consecuencia más estricta y de mayor alcance de un universo con maquinaria de relojería:

> Un cerebro inteligente que, en un momento dado, pudiera comprender todas las fuerzas por las cuales la naturaleza es algo animado y la situación respectiva de los seres que la forman, y si además ese cerebro es suficientemente amplio como para someter estos datos a análisis, este cerebro abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los de los átomos más ligeros. Para una inteligencia así nada sería incierto, y el futuro, como el pasado, se abriría ante sus ojos. [119]

Dicho en otras palabras, si en algún instante conociéramos las posiciones y las velocidades de todas las partículas del universo, podríamos utilizar las leyes de Newton del movimiento para determinar —al menos en principio— sus posiciones y velocidades en cualquier momento anterior o futuro. Desde este punto de vista, cualquier suceso, desde la formación del Sol hasta la crucifixión de Cristo, o el movimiento que hace usted con sus ojos recorriendo esta frase, se deducen estrictamente de las posiciones y velocidades exactas de las partículas que constituyen el universo un instante después del *big bang*. Esta rígida y cerrada visión del desarrollo del universo plantea todo tipo de dilemas filosóficos que nos dejan perplejos con respecto a la cuestión del libre albedrío, pero su importancia se redujo sustancialmente con el descubrimiento de la mecánica cuántica. Hemos visto anteriormente que el principio de incertidumbre de Heisenberg socava el determinismo laplaciano, porque según dicho principio no podemos conocer con exactitud las posiciones y las velocidades de los constituyentes del universo. En vez de ser así, estas propiedades clásicas quedan reemplazadas por las funciones de onda cuánticas, que sólo nos dicen la probabilidad de que cualquier partícula dada esté aquí o allá, o de que tenga esta o aquella velocidad.

Sin embargo, el ocaso de la visión de Laplace no deja el concepto de determinismo totalmente arruinado. Las funciones de onda —las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica— evolucionan con el tiempo según unas reglas matemáticas precisas, tales como la ecuación de Schrödinger (o sus más precisas contrapartidas relativistas, como la ecuación de Dirac y la ecuación de Klein-Gordon). Esto nos indica que el *determinismo cuántico* reemplaza al determinismo clásico de Laplace: el conocimiento de las funciones de onda de todos los

constituyentes fundamentales del universo en algún instante permite a una inteligencia «suficientemente potente» determinar las funciones de onda en cualquier instante anterior o futuro. El determinismo cuántico nos dice que la *probabilidad* de que cualquier suceso concreto tenga lugar en cualquier momento dado del futuro está plenamente *determinada* por el conocimiento de las funciones de onda en cualquier momento anterior. El aspecto probabilístico de la mecánica cuántica suaviza significativamente el determinismo laplaciano, desplazando la inevitabilidad de los sucesos hacia las probabilidades de dichos sucesos, pero estas últimas están totalmente determinadas dentro del marco convencional de la teoría cuántica.

En 1976, Hawking declaró que incluso esta forma más suave de determinismo queda contradicha por la presencia de los agujeros negros. Una vez más, los cálculos en los que se apoya esta declaración son extraordinariamente complicados, pero la idea esencial está muy clara. Cuando cualquier cosa cae en un agujero negro, su función de onda también queda absorbida por éste. Pero esto significa que en la búsqueda para desarrollar funciones de onda de todos los instantes futuros, esa inteligencia «suficientemente potente» se verá irremediablemente defraudada. Para predecir totalmente el futuro necesitamos conocer en su totalidad todas las funciones de onda que existen actualmente. Pero, si algunas han desaparecido en el abismo de los agujeros negros, la información que contenían se ha perdido.

A primera vista, esta complicación que plantean los agujeros negros puede no parecer un motivo de preocupación. Puesto que todo lo que se va más allá del horizonte de sucesos de un agujero negro queda aislado del resto del universo, ¿no podemos limitamos a ignorar completamente algo que ha tenido la mala suerte de caer dentro del agujero? Además, desde un punto de vista filosófico, ¿no podemos decirnos a nosotros mismos que el universo realmente no ha perdido la información transportada por la materia que ha caído en el agujero negro? ¿No será sencillamente que la información está ligada a una región del espacio que los seres racionales preferimos evitar a toda costa? Antes de que Hawking descubriera que los agujeros negros no son del todo negros, la respuesta a estas preguntas era sí. Pero, una vez que Hawking comunicó al mundo que los agujeros negros emiten radiaciones, la historia cambió. Una radiación transporta energía y, por lo tanto, cuando un agujero negro emite una radiación, su masa se reduce lentamente —se evapora lentamente—. Cuando sucede esto, la distancia desde el centro del agujero hasta el horizonte de sucesos se reduce lentamente y, a medida que este velo de misterio retrocede, en el escenario cósmico vuelven a aparecer regiones del espacio que habían estado hasta entonces aisladas. Ahora es cuando nuestras meditaciones filosóficas deben afrontar las consecuencias: cuando el agujero negro se evapora, ¿vuelve a emerger la información —los datos que imaginábamos que existían en el interior del agujero negro— contenida en los objetos que éste había tragado? Ésta es la información que

se necesita para que el determinismo cuántico se cumpla, por lo que esta pregunta va al fondo de la cuestión relativa a si los agujeros negros impregnan la evolución del universo con un elemento de azar aún más profundo.

En las fechas en que se está escribiendo esto, todavía no hay consenso entre los físicos sobre la respuesta a esta pregunta. Durante muchos años, Hawking había afirmado rotundamente que la información no vuelve a emerger, que los agujeros negros destruyen la información «introduciendo un nuevo nivel de incertidumbre en la física, añadido a la incertidumbre habitual asociada a la teoría cuántica».[120] De hecho, Hawking, junto con Kip Thorne del Instituto de Tecnología de California, tenía una apuesta con John Preskill, también del Instituto de Tecnología de California, relativa a lo que le sucede a la información que captura un agujero negro: Hawking y Thorne apostaban a que la información se perdía para siempre, mientras que Preskill había adoptado la postura contraria y apostaba a que la información volvía a emerger cuando el agujero negro emitía radiación y se reducía. ¿Qué apostaban? Información: «El perdedor recompensará al ganador con una enciclopedia que éste mismo podrá elegir».

La apuesta sigue sin resolverse, pero Hawking ha reconocido recientemente que los conocimientos adquiridos en los últimos tiempos en relación con los agujeros negros a partir de la teoría de cuerdas, como ya hemos comentado anteriormente, demuestran que podría haber un modo de que la información volviera a emerger.[121] La nueva idea es que para el tipo de agujeros negros estudiados por Strominger y Vafa, y por muchos otros físicos desde su publicación inicial, la información se puede almacenar y recuperar a partir de las branas constituyentes. Strominger dijo recientemente que esta idea «ha llevado a algunos especialistas en teoría de cuerdas a querer anunciar la victoria: anunciar que la información se recupera a medida que el agujero negro se evapora. En mi opinión esta conclusión es prematura; todavía hay mucho trabajo por hacer para ver si esto es cierto».[122] Vafa está de acuerdo con esto y dice que él «es agnóstico por lo que se refiere a esta cuestión; podría resultar cierta cualquiera de las posibilidades».[123] La respuesta a esta pregunta es un objetivo central de la investigación actual. Como Hawking ha escrito:

> La mayoría de los físicos desea creer que la información no se pierde, ya que esto haría que el mundo fuese seguro y predecible. Pero creo que si nos tomamos en serio la relatividad general de Einstein, debemos considerar la posibilidad de que el espacio-tiempo forme por sí mismo nudos y la información se pierda en los pliegues de estos nudos. Determinar si la información realmente se pierde o no, es actualmente una de las cuestiones más importantes de la física teórica.[124]

El segundo misterio de los agujeros negros que continúa sin resolverse se refiere a la naturaleza del espacio-tiempo en el punto central del agujero.[125] Una aplicación clara de la relatividad general, retrocediendo hasta Schwarzschild en 1916, muestra que las enormes cantidades de masa y energía que están aplastadas en el centro del agujero negro son la causa de que la estructura del espacio-tiempo sufra una escisión devastadora, quedando completamente enrollada en un estado de curvatura infinita, es decir, queda perforada por una peculiaridad del espacio-tiempo. Una conclusión que los físicos extraen de esto es que, dado que toda la materia que ha atravesado el horizonte de sucesos es conducida inexorablemente al centro del agujero negro, y dado que una vez allí la materia no tiene futuro, el propio tiempo llega a su fin en el centro de un agujero negro. Otros físicos, que a lo largo de los años han explorado las propiedades del núcleo de un agujero negro utilizando las ecuaciones de Einstein, plantearon la increíble posibilidad de que podría existir una puerta de entrada a otro universo que se comunica con nosotros de una manera tenue sólo a través del centro de un agujero negro. Dicho en pocas palabras, precisamente donde el tiempo termina en nuestro universo, empieza el tiempo en el universo anexo.

En el próximo capítulo abordaremos algunas de las implicaciones de esta posibilidad tan asombrosa, pero, por ahora, lo que queremos es subrayar una cuestión importante. Debemos recordar la regla principal: los casos extremos de enorme masa y pequeño tamaño, que por consiguiente tienen una densidad increíblemente grande, invalidan la mera aplicación de la teoría clásica de Einstein y exigen que también se aplique la mecánica cuántica. Esto nos lleva a plantearnos la siguiente pregunta: ¿qué tiene que decir la teoría de cuerdas sobre la peculiaridad del espacio-tiempo en el centro de un agujero negro? Actualmente esta cuestión está siendo objeto de intensas investigaciones, pero, igual que en el caso de la pérdida de información, aún no se ha hallado la respuesta. La teoría de cuerdas trata otras peculiaridades varias con destreza —las escisiones y los rasgados del espacio, como se vio en el capítulo 11 y en la primera parte de este capítulo—.[126] Pero, si se ha visto una singularidad, *no* se han visto todas. La estructura del universo se puede escindir, perforar y rasgar de muchas maneras diferentes. La teoría de cuerdas nos ha aportado explicaciones a fondo relativas a algunas de estas singularidades, pero otras, entre ellas la singularidad del agujero negro, han quedado hasta ahora fuera del alcance de los especialistas en teoría de cuerdas. La razón esencial de esto es, una vez más, la dependencia de herramientas perturbativas en la teoría de cuerdas cuyas aproximaciones, en este caso, obstaculizan nuestra capacidad de analizar confiable y plenamente lo que sucede en el profundo punto interior de un agujero negro.

Sin embargo, dado el enorme progreso que ha tenido lugar recientemente en los métodos no perturbativos y su aplicación con éxito a otros aspectos de los agujeros negros, los especialistas en teoría de cuerdas tienen grandes esperanzas de que no

pasará mucho tiempo antes de que empiecen a revelarse los misterios que residen en el centro de los agujeros negros.

Reflexiones sobre Cosmología

Los seres humanos a lo largo de la historia han manifestado un impulso apasionado por conocer el origen del universo. Quizá no exista una sola cuestión que trascienda de tal manera las divisiones culturales y temporales, ya que ha inspirado tanto la imaginación de nuestros más remotos antepasados, como la investigación de los cosmólogos modernos. A un nivel profundo, existe un ansia colectiva por lograr una explicación de por qué hay un universo, cómo ha llegado a adoptar la forma en que lo conocemos y cuál es el principio racional que impulsa su evolución. Lo asombroso es que la humanidad ha llegado actualmente a un punto en que surge un marco especial para responder a algunas de estas cuestiones científicamente.

La teoría científica de la creación que se acepta hoy en día afirma que el universo experimentó las condiciones más extremas —energía, temperatura y densidad enormes— durante sus primeros momentos. Estas condiciones, por lo que se sabe actualmente, requieren que se tengan en cuenta tanto la mecánica cuántica como la gravedad, y por consiguiente el nacimiento del universo proporciona un amplio escenario para aplicar las ideas de la teoría de las supercuerdas. Discutiremos luego estas ideas incipientes, pero primero haremos un breve relato de la historia cosmológica anterior a la teoría de cuerdas, una historia que a menudo se menciona denominándola *modelo estándar de la cosmología*.

El modelo estándar de la Cosmología

La teoría moderna de los orígenes cósmicos data de una década y media después de que Einstein concluyera su teoría de la relatividad general. Aunque Einstein se negó a creer a pies juntillas su propia teoría y a aceptar que implica que el universo no es ni eterno, ni estático, Alexander Friedmann sí la creyó. Como ya explicamos en el capítulo 3, Friedmann descubrió lo que ahora se conoce como la solución *big bang* de

las ecuaciones de Einstein, una solución que pone de manifiesto que el universo surgió de manera violenta de un estado de compresión infinita y se encuentra actualmente en una fase expansiva como consecuencia de aquella primitiva explosión. Einstein estaba tan seguro de que tales soluciones variables con el tiempo no eran un resultado de su teoría, que publicó un breve artículo en el que afirmaba haber hallado una falla fatal en el trabajo de Friedmann. Sin embargo, unos ocho meses más tarde, Friedmann logró convencer a Einstein de que no había, de hecho, ninguna falla; Einstein se retractó de su objeción pública pero lacónicamente. No obstante, está claro que Einstein no pensó que los hallazgos de Friedmann tuvieran relevancia alguna en relación con el universo. Sin embargo, unos cinco años más tarde, las minuciosas observaciones de Hubble, cuyo objeto fueron unas pocas docenas de galaxias y se realizaron con el telescopio de cien pulgadas situado en el observatorio del monte Wilson, confirmaron que, efectivamente, el universo se expande. El trabajo de Friedmann, remodelado de una manera más sistemática y eficiente por los físicos Howard Robertson y Arthur Walker, sigue constituyendo la base de la moderna cosmología.

Un poco más detalladamente, la teoría moderna de los orígenes cósmicos es más o menos así. Hace aproximadamente 15 mil millones de años, el universo surgió a partir de un suceso singular y enormemente energético, que lanzó todo el espacio y toda la materia. (No hay que ir muy lejos para situar el lugar donde ocurrió el *big bang*, ya que se produjo donde está usted ahora y en cualquier otro sitio; al principio, todos los lugares que vemos ahora separados eran el *mismo* lugar). La temperatura del universo unos 10^{-43} segundos después de la explosión, el llamado *tiempo de Planck*, se calcula que fue de unos 10^{32} grados Kelvin, más o menos 10 billones de billones más caliente que el interior profundo del Sol. En el transcurso del tiempo, el universo fue expandiéndose y enfriándose, y así, el plasma inicialmente homogéneo, terriblemente caliente, que fue el estado primitivo del universo, empezó a formar remolinos y grumos. Una cienmilésima de segundo después de la explosión, esto se había enfriado lo suficiente (a unos 10 billones de grados Kelvin, alrededor de un millón de veces más caliente que el interior del Sol) para que los quarks se agruparan en grupos de tres, formando protones y neutrones. Aproximadamente una centésima de segundo más tarde, las condiciones eran las adecuadas para que los núcleos de algunos de los elementos más ligeros de la tabla periódica comenzaran a formarse saliendo fuera de aquel plasma de partículas que se enfriaba. Durante los tres minutos siguientes, cuando el hirviente universo se enfrió hasta una temperatura de unos mil millones de grados, los núcleos que emergían eran predominantemente los de hidrógeno y helio, junto con algunas cantidades muy pequeñas de deuterio (hidrógeno «pesado») y litio. Esto se conoce como el período de la *nucleosíntesis primordial*.

Durante los pocos cientos de miles de años siguientes, no sucedieron muchas cosas, salvo la expansión y el enfriamiento posteriores. Pero entonces, cuando la temperatura había descendido ya a unos pocos miles de grados, unas corrientes salvajes de electrones fueron frenando su velocidad hasta el punto en que los núcleos atómicos, en su mayoría de hidrógeno y helio, pudieron capturarlos, formando los primeros átomos eléctricamente neutrales. Éste fue un momento decisivo: a partir de ese instante el universo, en general, se volvió transparente. Con anterioridad a la era de la captura de electrones, el universo estaba lleno de un denso plasma de partículas con carga eléctrica, algunas con cargas positivas, como los núcleos, y otras con cargas negativas, como los electrones. Los fotones, que interaccionan sólo con objetos cargados eléctricamente, fueron golpeados y empujados sin cesar por el espeso baño de partículas con carga, recorriendo apenas una breve distancia antes de ser desviados o absorbidos. La barrera de partículas cargadas que obstaculizaba el libre movimiento de los fotones habría hecho que el universo tuviera un aspecto casi completamente opaco, algo parecido a lo que se puede sentir en una densa niebla matinal o en una tormenta de nieve ventosa y cegadora. Pero, cuando los electrones, con su carga negativa, se pusieron a orbitar alrededor de núcleos cargados positivamente, produciendo así átomos eléctricamente neutros, desaparecieron las obstrucciones que formaban las partículas cargadas y la densa niebla se disipó. A partir de aquel momento, los fotones procedentes del *big bang* han estado desplazándose sin obstáculos y se ha hecho visible gradualmente la plena expansión del universo.

Alrededor de mil millones de años más tarde, cuando el universo ya se había calmado sustancialmente con respecto a su frenético comienzo, las galaxias, las estrellas y, por fin, los planetas empezaron a emerger como conglomerados formados gravitacionalmente a partir de los primeros elementos fundamentales. Actualmente, unos 15 mil millones de años después de la explosión, nos podemos maravillar de la magnificencia del cosmos y también de nuestra capacidad colectiva para construir una teoría razonable y experimentalmente comprobable sobre el origen del cosmos.

Pero ¿hasta qué punto podemos *realmente* tener fe en la teoría del *big bang*?

Poniendo el Big Bang bajo examen

Observando el universo con sus más poderosos telescopios, los astrónomos pueden ver la luz que emitieron las galaxias y los quásares unos pocos miles de millones de años después del *big bang*. Esto les permite verificar la expansión del universo,

predicha por la teoría del *big bang*, hasta esta primera fase, y todo encaja perfectamente. Para comprobar la teoría hasta tiempos aún más remotos, los físicos y los astrónomos han de utilizar métodos más indirectos. Uno de los métodos más precisos incluye algo que se conoce como *radiación cósmica de fondo*.

Si alguna vez ha tocado usted un neumático de bicicleta después de inflarlo con aire vigorosa y completamente, sabe que resulta caliente al tacto. Esto es porque las cosas que se comprimen se calientan —este es el principio, por ejemplo, de la olla a presión, en la cual el aire se comprime en una cámara sellada para conseguir temperaturas de cocción inusualmente altas—. Razonando a la inversa, cuando algo logra descomprimirse —expandirse— se enfría. Si se remueve la válvula de una olla a presión —o, más espectacularmente, se deja escapar todo el aire que contiene— el aire se expande a su densidad ordinaria y se enfría a la temperatura ambiente. Esta es la ciencia que subyace a la frase «soltar el vapor», una aproximación familiar a «enfriar» una situación caliente. Aunque se trata de fenómenos sencillos de la física terrestre, resulta que estas sencillas observaciones tienen una profunda significación dentro del cosmos en su conjunto.

Vimos anteriormente que, después de que los electrones y los núcleos se unieran para formar átomos, los fotones quedaron libres para viajar sin obstáculos a través del universo, tal como los átomos de aire de una olla a presión caliente recién abierta. Y tal como el aire en la olla a presión se enfría cuando se suelta la válvula y se le permite expandirse, lo mismo es verdad para el «gas de fotones» que viaja por el universo mientras se expande. De hecho, algunos físicos, remontándonos a George Gamow y sus discípulos Ralph Alpher y Robert Hermann en la década de 1950, y Robert Dicke y Jim Peebles a mediados de la década de 1960; descubrieron que el universo actual tendría que estar impregnado por un baño casi uniforme de esos fotones iniciales, que, a lo largo de los últimos 15 mil millones de años de expansión cósmica, se han enfriado hasta una temperatura de unos pocos grados sobre el cero absoluto.[127] En 1965, Arno Penzias y Robert Wilson, de los Laboratorios Bell de Nueva Jersey, realizaron accidentalmente uno de los más importantes descubrimientos de nuestra era, al detectar este resplandor crepuscular del *big bang* cuando estaban trabajando en una antena destinada a ser utilizada con los satélites de comunicaciones. Otras investigaciones posteriores han perfeccionado la teoría y las pruebas experimentales, culminando en unas mediciones realizadas por el satélite COBE *(Cosmic Background Explorer)* de la NASA a principios de la década de 1990. Con estos datos, los físicos y los astrónomos han confirmado con una alta precisión que el universo está lleno de radiaciones de microondas (si nuestros ojos fueran sensibles a las microondas veríamos un resplandor difuso en el mundo que nos rodea) cuya temperatura es de unos 2,7 grados sobre el cero absoluto, lo cual concuerda exactamente con las expectativas de la teoría del *big bang*. Concretamente, *en cada*

metro cúbico del universo —incluido el que ocupa usted ahora mismo— hay, como media, unos 400 millones de fotones que constituyen en conjunto el amplio mar cósmico de la radiación de microondas, un eco de la creación. Un porcentaje de la «nieve» que usted ve en la pantalla del televisor, cuando desconecta el cable y sintoniza una emisora que ha terminado su horario de emisiones, se debe a esta leve secuela del *big bang*. Esta concordancia entre la teoría y los hechos experimentales confirma el relato del *big bang* que hace la cosmología en una retrospectiva que llega hasta el momento en que los fotones empezaron a moverse libremente por el universo, unos pocos cientos de miles de años «después de la explosión», es decir, «ATB» *(after the bang)*.

¿Podemos retroceder aún más con nuestra comprobación de la teoría del *big bang* hasta épocas anteriores? Sí podemos. Aplicando principios estándares de la teoría nuclear y de la termodinámica, los físicos pueden hacer predicciones concretas sobre la abundancia relativa de los elementos ligeros producidos durante el período de la síntesis nuclear primordial, que se sitúa entre una centésima de segundo y unos pocos minutos ATB. De acuerdo con la teoría, por ejemplo, alrededor del 23 por 100 del universo tendría que estar compuesto por helio. Midiendo la cantidad de helio que hay en las estrellas y en las nebulosas, los astrónomos han reunido pruebas con las que justificar que, de hecho, esta predicción es acertada. Quizá sean aún más impresionantes la predicción y la confirmación relativas a la cantidad de deuterio, ya que no hay esencialmente ningún proceso astrofísico, salvo el *big bang*, que pueda ser responsable de esta pequeña pero definida presencia del deuterio por todo el cosmos. La confirmación de estas cantidades, y más recientemente de la de litio, constituye una sensitiva comprobación de nuestros conocimientos sobre la física del universo inicial, remontándonos hasta la época de la síntesis primordial de estas cantidades.

Esto es tan impresionante que puede llevamos a un orgullo arrogante. Todos los datos de que disponemos confirman una teoría de la cosmología capaz de describir el universo desde aproximadamente una centésima de segundo ATB hasta el presente, unos 15 mil millones de años más tarde. Sin embargo, no deberíamos perder de vista el hecho de que el recién nacido universo evolucionó con una premura fenomenal. Unas diminutas fracciones de segundo —fracciones *mucho* menores que una centésima de segundo— constituyen épocas cósmicas durante las cuales quedaron fijadas por primera vez unas características del universo que habrían de mantenerse a muy largo plazo. Así, los físicos han continuado avanzando, intentando explicar cómo era el universo en épocas aún más tempranas. Dado que el universo se hace cada vez más pequeño, más caliente y más denso a medida que vamos hacia atrás, cada vez resulta más importante realizar una descripción mecánico-cuántica de la materia y de las fuerzas. Como ya hemos visto en capítulos anteriores, desde otros

puntos de vista, la teoría de campos cuánticos de partículas puntuales funciona hasta que las energías típicas de las partículas se sitúan en torno a la energía de Planck. En un contexto cosmológico, esto sucedía cuando la totalidad del universo conocido cabía dentro de una nuez del tamaño de la longitud de Planck, produciendo una densidad tan grande que agota cualquier posibilidad de hallar una metáfora adecuada o una analogía iluminadora: la densidad del universo cuando había transcurrido el tiempo de Planck era sencillamente *colosal*. Con tales energías y densidades, la gravedad y la mecánica cuántica no pueden seguir tratándose como dos entidades separadas, tal y como aparecen en la teoría de campos cuánticos de partículas puntuales. En vez de esto, el mensaje central del presente libro es que con estas energías enormes, y con cualesquiera otras superiores, debemos apelar a la teoría de cuerdas. En términos temporales, nos encontramos con estas energías y densidades cuando hacemos pruebas con anterioridad al tiempo de Planck de 10^{-41} segundos ATB, y por lo tanto este tempranísimo momento es la arena cosmológica de la teoría de cuerdas.

Vayamos hacia esta época, viendo primero lo que nos dice la teoría cosmológica estándar sobre lo que era el universo antes de una centésima de segundo ATB, pero después del tiempo de Planck.

Desde el tiempo de Planck hasta la centésima de Segundo ATB

Recordemos del capítulo 7 (especialmente de la Figura 7.1) que las tres fuerzas no gravitatorias parecen fusionarse unas con otras en el entorno intensamente caliente del universo primitivo. Los cálculos de los físicos sobre el modo en que varían las intensidades de estas tres fuerzas al variar la energía y la temperatura muestran que con anterioridad a unos 10^{-35} segundos ATB, las fuerzas nucleares fuerte y débil, así como la fuerza electromagnética, eran todas ellas una sola «súper» fuerza o una «gran fuerza unificada». En este estado, el universo era mucho más simétrico que lo que es actualmente. Como sucede con la homogeneidad que aparece como consecuencia cuando un conjunto de metales diferentes se calienta hasta fundirse en un líquido sin grumos, las diferencias significativas entre las fuerzas tal como hoy en día las observamos quedaban borradas por los valores extremos de la energía y la temperatura que se daban en las etapas muy tempranas del universo. Pero, a medida que el tiempo transcurría y el universo se expandía y se enfriaba, según las fórmulas de la teoría cuántica de campos se demuestra que esta simetría se habría visto

reducida drásticamente a lo largo de cierto número de pasos bastante abruptos que condujeron por fin a la forma comparativamente asimétrica que a nosotros nos resulta familiar.

No es difícil comprender las propiedades físicas que están detrás de tal reducción de la simetría o *ruptura de la simetría*, que es como se suele llamar en una terminología más precisa. Imaginemos un gran contenedor lleno de agua. Las moléculas de H_2O están repartidas uniformemente por todo el interior del contenedor e, independientemente del ángulo desde el cual la observemos, el agua tiene siempre el mismo aspecto. A continuación, observemos el contenedor cuando hacemos que la temperatura descienda. Al principio no sucede gran cosa. A escalas microscópicas, la velocidad media de las moléculas de agua disminuye, pero esto viene a ser todo. Sin embargo, cuando la temperatura en descenso llega a los 0 grados Celsius, vemos que, de repente, sucede algo drástico. El agua líquida empieza a congelarse y se convierte en hielo sólido. Como explicamos en el capítulo anterior, esto no es más que un sencillo examen de una transición de fase. Para nuestros propósitos actuales, lo importante es observar que la transición de fase da como resultado una disminución de la cantidad de simetría que presentan las moléculas de H_2O. Mientras el agua líquida tiene el mismo aspecto independientemente del ángulo desde el cual se contemple —posee simetría de rotación— el hielo sólido es diferente. Posee una estructura de bloque cristalina, lo que significa que si se observa con una precisión adecuada, parecerá diferente desde diferentes ángulos, igual que cualquier cristal. La transición de fase ha producido una disminución manifiesta de la cantidad de simetría de rotación.

Aunque sólo hemos explicado un ejemplo corriente conocido, el fenómeno es cierto en un ámbito más general: en muchos sistemas físicos, cuando hacemos que la temperatura descienda, en algún momento los sistemas experimentan una transición de fase que suele producir una disminución o «ruptura» de parte de sus simetrías anteriores. De hecho, un sistema puede atravesar una serie de transiciones de fase si se hace variar su temperatura en una gama de valores suficientemente amplia. Una vez más, el agua constituye un ejemplo sencillo de entender. Si comenzamos por observar el H_2O a más de 100 grados Celsius, tendremos un gas: el vapor de agua. En esta forma, el sistema posee aún más simetría que en su fase líquida, ya que ahora las moléculas de H_2O se han liberado de su forma líquida que las hace estar apiñadas y pegadas unas a otras. En forma de vapor, se mueven rápidamente por todo el contenedor, independientes unas de otras, sin formar grupos ni «pandillas» en los que los grupos de moléculas se distinguen unos de otros por la fuerte asociación, a expensas de estar esas moléculas separadas de otras. La democracia molecular prevalece a temperaturas suficientemente altas. Cuando hacemos que la temperatura descienda por debajo de los 100 grados, se forman gotas de agua mientras

atravesamos una transición de fase gas— líquido, y la simetría se reduce. Si continuamos descendiendo a temperaturas aún más bajas, no sucede nada drástico hasta que pasamos los 0 grados Celsius, y es entonces cuando la transición de fase agua-líquida/hielo-sólido, tal como hemos mencionado anteriormente, produce otra disminución brusca de la simetría.

Los físicos creen que entre el tiempo de Planck y una centésima de segundo ATB, el universo se comportaba de un modo muy similar, pasando a través de al menos dos transiciones de fase análogas. A temperaturas superiores a 10^{28}1028 grados Kelvin, las tres fuerzas no gravitatorias se presentan como una sola, todo lo simétricas que pueden ser. (Al final de este capítulo comentaremos la inclusión, según la teoría de cuerdas, de la fuerza gravitatoria en esta fusión a altas temperaturas). Sin embargo, cuando la temperatura cayó por debajo de los 10^{28} grados Kelvin, el universo experimentó una transición de fase en la que las tres fuerzas cristalizaron de distintos modos abandonando su unidad anterior. Sus intensidades relativas y los detalles de su manera de actuar sobre la materia comenzaron a diverger. Así, la simetría que es evidente entre las fuerzas a altas temperaturas quedó rota cuando el universo se enfrió. No obstante, los trabajos de Glashow, Salam y Weinberg (véase el capítulo 5) demuestran que no desapareció toda la simetría que existía a altas temperaturas: la fuerza nuclear débil y la fuerza electromagnética estaban todavía profundamente entretejidas. Mientras el universo seguía expandiéndose y enfriándose, no hubo grandes cambios hasta que la temperatura descendió a 10^{15} grados Kelvin, alrededor de 100 millones de veces la temperatura del centro del Sol. Entonces el universo atravesó otra transición de fase que afectó a las fuerzas nuclear débil y electromagnética. A esta temperatura, dichas fuerzas también cristalizaron en dos fuerzas separadas, saliendo de su unión anterior, que era más simétrica, y, cuando el universo se enfrió aún más, sus diferencias se fueron acentuando. Estas dos transiciones de fase son la causa de que existan las tres fuerzas no gravitatorias aparentemente distintas que funcionan en el universo, aunque esta revisión de la historia cósmica muestra que, de hecho, estas fuerzas están profundamente relacionadas entre sí.

Rompecabezas Cosmológico

La cosmología de esta era posterior a Planck proporciona un marco elegante, coherente y manejable mediante cálculos para conocer el universo remontándonos a los primeros momentos más breves posteriores a la explosión. Sin embargo, como ha

sucedido con las teorías de mayor éxito, nuestras nuevas ideas plantean preguntas aún más precisas. De ello resulta que algunos de estos interrogantes, al mismo tiempo que no invalidan el escenario cosmológico estándar, sí que ilustran algunos aspectos incómodos que sugieren la necesidad de una teoría más profunda. Centrémonos en uno de ellos. Se llama el *problema del horizonte* y es uno de los temas más importantes dentro de la moderna cosmología.

Estudios detallados de la radiación cósmica de fondo han demostrado que independientemente de la dirección del cielo en la cual se oriente la antena de las mediciones, la temperatura de esta radiación es la misma, salvo un error de aproximadamente una cienmilésima. Si lo pensamos durante un momento, nos daremos cuenta de que esto es bastante extraño. ¿Por qué sucede que diferentes lugares del universo, separados por distancias enormes, tienen unas temperaturas que son tan similares? Una solución aparentemente natural de este rompecabezas es considerar que dos lugares diametralmente opuestos del universo están muy alejados actualmente, pero, como unos gemelos separados al nacer, durante los primeros momentos de existencia del universo, esos lugares (y todos los demás) se encontraban muy cerca. Dado que emergieron de un punto de partida común, no es para nada sorprendente que compartan características físicas comunes tales como la temperatura.

En la cosmología estándar del *big bang* esta idea no es cierta. Veamos por qué. Un plato de sopa caliente se enfría gradualmente hasta llegar a la temperatura ambiente porque está en contacto con el aire que le rodea y éste está más frío. Si esperamos el tiempo suficiente, la temperatura de la sopa y del aire llegarán a ser la misma, debido al contacto mutuo. Pero si la sopa está en un termo, desde luego retendrá su calor durante mucho más tiempo, ya que hay mucha menos comunicación con el entorno exterior. Esto indica, que la homogeneización de la temperatura de dos cuerpos depende de que mantengan una comunicación prolongada y constante. Para comprobar la idea de que unas posiciones que estén actualmente separadas por grandes distancias en el espacio comparten la misma temperatura debido a su contacto inicial, debemos examinar la eficacia del intercambio de información entre ambas posiciones en el universo inicial. Al principio se podría pensar que, dado que las posiciones estaban más cercanas en los primeros tiempos, la comunicación era aún más fácil. Sin embargo, la proximidad espaciales sólo una parte de la historia. La otra parte es la duración temporal.

Para examinar esto de una manera más completa, supongamos que estamos analizando una «película» de la expansión cósmica, pero revisémoslo al revés, rebobinando la película hacia atrás en el tiempo, desde el momento presente hasta el momento del *big bang*. Puesto que la velocidad de la luz constituye un límite a la velocidad con la que cualquier señal o información de cualquier tipo puede

desplazarse, la materia de las dos regiones del espacio puede intercambiar energía de calentamiento y, por consiguiente, tener la oportunidad de llegar a una temperatura ordinaria sólo si la distancia entre ellas en un momento dado es menor que la distancia que la luz ha podido recorrer desde el momento del *big bang*. Por lo tanto, cuando rebobinamos la película hacia atrás en el tiempo, vemos que existe una competición entre la cercanía a la que llegan nuestras dos regiones y el tiempo que tenemos que hacer retroceder el reloj para que dichas regiones lleguen a esa posición. Por ejemplo, si con el fin de conseguir que la separación entre las dos ubicaciones espaciales sea de unos 300.000 kilómetros hemos de rebobinar la película hasta menos de un segundo ATB, entonces, aunque están mucho más cerca, sigue sin haber modo de que ejerzan influencias mutuas, ya que la luz necesitaría un segundo completo para recorrer la distancia que los separa.[128] Si para lograr una separación mucho menor, por ejemplo de unos 300 kilómetros, hemos rebobinado la película hasta menos de una milésima de segundo ATB, de nuevo se sigue la misma conclusión: no pueden ejercer influencia mutua, ya que en menos de una milésima de segundo la luz no puede recorrer los 300 kilómetros que los separan. Reiterando el mismo razonamiento, si hemos de rebobinar la película hasta menos de una milmillonésima de segundo ATB con el fin de que estas regiones se sitúen a menos de 30 centímetros de distancia, tampoco podrán ejercer ninguna influencia mutua, ya que no hay tiempo suficiente desde el momento de la explosión para que la luz haya recorrido esos 30 centímetros. Esto demuestra que, sólo porque dos puntos del universo estén cada vez más cercanos entre sí a medida que retrocedemos hacia la explosión, no se da forzosamente el caso de que puedan haber tenido el contacto térmico —como el que se da entre la sopa y el aire— necesario para llegar a tener la misma temperatura.

Los físicos han demostrado que es precisamente este problema el que surge en el modelo estándar del *big bang*. Unos cálculos minuciosos muestran que no hay modo de que dos regiones del espacio que actualmente estén muy alejadas hayan tenido el intercambio de energía térmica que explicaría el hecho de que tengan la misma temperatura. Dado que la palabra *horizonte* se refiere a la máxima distancia a la que podemos ver —la distancia hasta la cual la luz puede viajar, por decirlo así— los físicos le llaman «problema del horizonte» al caso, no explicado aún, de la uniformidad de temperatura por toda la vasta extensión del universo. La idea de rompecabezas no significa que la teoría cosmológica estándar esté equivocada. Pero la uniformidad de la temperatura es un claro indicio de que nos falta una parte importante de la historia cosmológica. En 1979, el físico Alan Guth, que ahora trabaja en el *Massachusetts Institute of Technology*, escribió el capítulo que falta.

Inflación

La raíz del problema del horizonte es que para conseguir que se acerquen mutuamente dos regiones del universo muy alejadas, hemos de hacer que la película cósmica retroceda hacia el principio del tiempo. De hecho, hay que retroceder tanto que no hay tiempo suficiente para que alguna influencia física haya viajado de una región a la otra. Por, consiguiente, la dificultad está en que, mientras rebobinamos la película cósmica y nos acercamos al *big bang*, el universo no se comprime a una velocidad lo suficientemente rápida.

Bueno, ésta es la idea dicha en pocas palabras, pero vale la pena afinar un poco la descripción. El problema del horizonte se plantea a partir del hecho de que, como sucede con una pelota lanzada hacia arriba, el tirón de arrastre de la gravedad hace que la velocidad de expansión del universo *se frene*. Esto significa que, por ejemplo, para reducir a la mitad la separación existente entre dos lugares del cosmos, hemos de hacer que la película retroceda más de medio camino hacia su comienzo. Así, vemos que para reducir la separación a la mitad, tenemos que reducir el tiempo a más de la mitad del que ha transcurrido desde el *big bang*. Menos tiempo transcurrido desde el *big bang* —proporcionalmente— significa que es más *difícil* que las dos regiones se comuniquen, aunque se acerquen cada vez más.

Es sencillo enunciar ahora la solución de Guth para el problema del horizonte. Guth halló otra solución para las ecuaciones de Einstein en la que el universo en sus primeros momentos pasa por un breve período de expansión enormemente rápida, un período durante el cual «hincha» su tamaño a una velocidad de expansión *exponencial* inesperada. A diferencia del caso de una pelota que se va frenando después de ser lanzada hacia arriba, esta expansión exponencial se vuelve *más rápida* a medida que se va produciendo. Cuando pasamos la película cósmica en sentido inverso, la expansión de aceleración rápida se convierte en una contracción con una rápida deceleración. Esto significa que para reducir a la mitad la separación entre dos lugares del cosmos (durante la época exponencial) necesitamos rebobinar la película menos de la mitad —en realidad, mucho menos—. Rebobinar menos la película significa que las dos regiones habrán tenido más tiempo para comunicarse térmicamente y, como en el caso de la sopa caliente y el aire, habrán tenido mucho tiempo para llegar a la misma temperatura.

Gracias al descubrimiento de Guth y a otros perfeccionamientos posteriores realizados por André Linde, actualmente en la Universidad de Stanford, Paul Steinhardt y Andreas Albrecht, que entonces trabajaban en la Universidad de Pensilvania, y muchos otros, el modelo cosmológico estándar quedó renovado con el nombre de modelo cosmológico *inflacionario*. En este marco, el modelo cosmológico estándar se modifica durante un pequeñísimo intervalo de tiempo —alrededor de

entre 10^{-36} y 10^{-34} segundos ATB— en el que el universo experimentó una expansión multiplicándose su tamaño por un factor cuyo valor es al menos 10^{30}, algo colosal comparado con un factor de 100, aproximadamente, que es el factor vigente durante el mismo intervalo de tiempo en el modelo estándar. Esto significa que en menos de un abrir y cerrar de ojos, algo así como una billonésima de una billonésima de una billonésima de un segundo ATB, el tamaño del universo aumentó en un porcentaje mayor que el que ha aumentado en los 15 mil millones de años siguientes. Antes de esta expansión, la materia que se encuentra actualmente repartida en extensas regiones del espacio estuvo reunida en un espacio mucho más pequeño que el que indica el modelo cosmológico estándar, siendo así posible que se estableciera fácilmente una temperatura común. Después, mediante la irrupción repentina de un hinchamiento cosmológico —seguido por la más habitual expansión que indica el modelo cosmológico estándar— estas regiones del espacio pudieron quedar separadas por las grandes distancias que constatamos actualmente. De esta manera, la breve pero profunda modificación del modelo cosmológico estándar, la modificación por hinchamiento, resuelve el problema del horizonte (así como varios otros problemas importantes que no hemos comentado) y ha encontrado una amplia aceptación entre los cosmólogos.[129]

En la Figura 14.1 resumimos la historia del universo, desde justo el instante posterior al tiempo de Planck, hasta el presente, de acuerdo con la teoría actual.

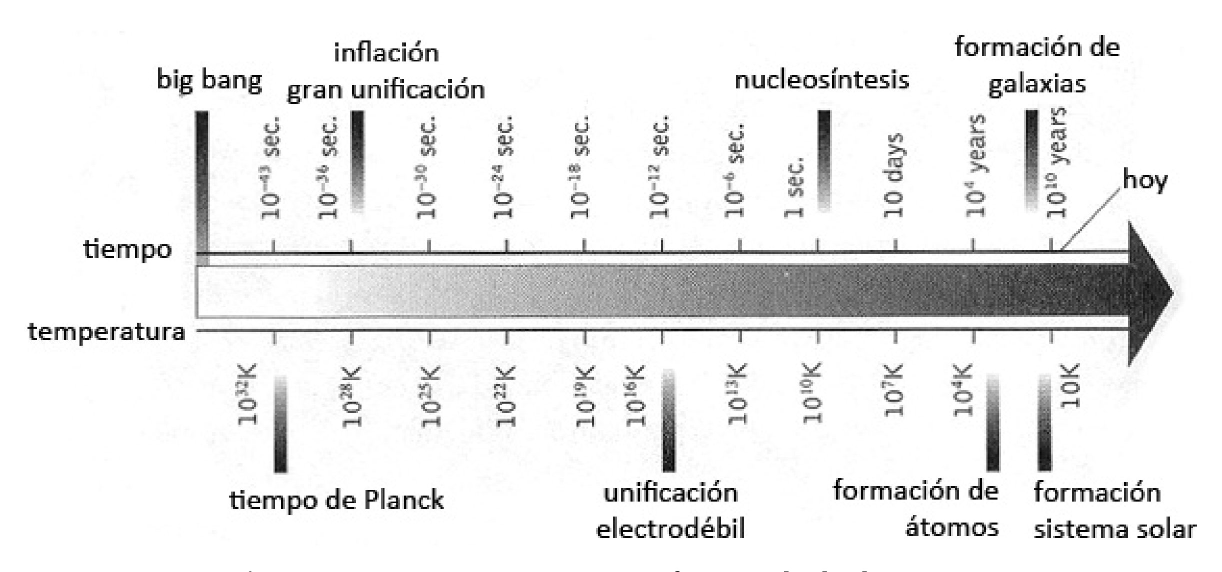


Figura 14.1 Unos pocos eventos significativos desde el *Big Bang*.

Cosmología y teoría de supercuerdas

Queda un pequeño intervalo en la Figura 14.1, entre el *big bang* y el tiempo de

Planck, que aún no hemos explicado. Aplicando a ciegas las ecuaciones de la relatividad general a ese pequeño intervalo, los físicos han descubierto que el universo sigue haciéndose cada vez más pequeño, más caliente y más denso, a medida que nos desplazamos hacia el *big bang*. En el instante cero, cuando el tamaño del universo desaparece, la temperatura y la densidad suben de manera vertiginosa hacia el infinito, dándonos la señal más rotunda de que este modelo teórico del universo, firmemente arraigado en el marco gravitatorio clásico de la relatividad general, se ha derrumbado por completo.

La naturaleza nos está diciendo enfáticamente que en tales condiciones debemos fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica —dicho de otra manera, que debemos utilizar la teoría de cuerdas—. Actualmente, la investigación que se lleva a cabo sobre las implicaciones que tiene la teoría de cuerdas para la cosmología está en una etapa temprana de desarrollo. Los métodos perturbativos pueden, en el mejor de los casos, ofrecemos unos conocimientos esqueléticos, ya que los extremos alcanzados por la energía, la temperatura y la densidad requieren un análisis de gran precisión. Aunque la segunda revolución de las supercuerdas ha proporcionado algunas técnicas no perturbativas, pasará algo de tiempo antes de que se perfeccionen estas técnicas para los tipos de cálculos requeridos en un planteamiento cosmológico. Sin embargo, como explicaremos ahora, durante más o menos la última década, los físicos han dado los primeros pasos hacia el conocimiento de la cosmología de cuerdas. He aquí lo que han descubierto.

Resulta que existen tres maneras esenciales según las cuales la teoría de cuerdas modifica el modelo cosmológico estándar. En primer lugar, de una manera que la investigación actual continúa clarificando, la teoría de cuerdas implica que el universo tiene lo que se podría considerar un tamaño mínimo posible. Esto tiene profundas consecuencias para nuestro conocimiento del universo en el momento del *big bang* mismo, cuando la teoría estándar afirma que el tamaño del universo se ha ido comprimiendo totalmente hasta cero. En segundo lugar, la teoría de cuerdas posee una dualidad radio-pequeño/radio-grande (íntimamente relacionada con el hecho de poseer un tamaño mínimo posible el universo) que tiene también un profundo significado cosmológico, como veremos dentro de un momento. Finalmente, la teoría de cuerdas tiene más de cuatro dimensiones espacio-tiempo, y desde un punto de vista cosmológico, debemos hablar de la evolución de todas ellas. Veamos estas cuestiones con más detalle.

En el comienzo había una pepita tamaño Planck

A finales de la década de 1980, Robert Brandenberger y Cumrun Vafa dieron los primeros pasos importantes para llegar a comprender el modo en que la aplicación de estas características de la teoría de cuerdas modifica las conclusiones de la teoría cosmológica estándar. Llegaron a dos importantes constataciones. En primer lugar, cuando hacemos que el reloj retroceda en el tiempo hacia el principio, la temperatura continúa elevándose hasta que el tamaño del universo es aproximadamente el de la longitud de Planck en todas las direcciones. Pero entonces la temperatura alcanza un *máximo* y empieza a *disminuir*. La razón intuitiva en que esto se basa no es difícil de deducir. Supongamos, para hacer las cosas más sencillas (como hicieron Brandenberger y Vafa) que todas las dimensiones espaciales del universo son circulares. Cuando hacemos que el reloj retroceda y el radio de cada uno de esos círculos se reduce, la temperatura del universo aumenta. Sin embargo, a medida que cada uno de los radios va disminuyendo hacia la longitud de Planck y luego pasa por este valor, sabemos que, en la teoría de cuerdas, esto es físicamente idéntico al caso en que los radios se comprimen hasta la longitud de Planck y luego rebotan y empiezan a crecer. Dado que las temperaturas descienden cuando el universo se expande, podríamos esperar que el intento fútil de estrujar el universo hasta tamaños inferiores a la longitud de Planck significa que la temperatura deja de subir, alcanza un máximo, y luego empieza a descender. Mediante cálculos minuciosos, Brandenberger y Vafa verificaron de manera explícita que éste es precisamente el caso.

Esto llevó a Brandenberger y Vafa a la siguiente descripción cosmológica. Al principio, todas las dimensiones espaciales de la teoría de cuerdas están firmemente arrolladas hasta alcanzar su extensión mínima posible, que es aproximadamente la longitud de Planck. La temperatura y la energía son altas, pero no infinitas, ya que la teoría de cuerdas ha evitado los enigmas que plantea un punto de partida de tamaño nulo infinitamente comprimido. En este momento del principio del universo, todas las dimensiones espaciales de la teoría de cuerdas están en una situación exactamente igual —son completamente simétricas—, es decir, todas ellas arrolladas en una pepita multidimensional del tamaño de la longitud de Planck. Entonces, según Brandenberger y Vafa, el universo atraviesa su primera etapa de reducción de la simetría, cuando, más o menos en el momento en que se cumple el tiempo de Planck, tres de las dimensiones espaciales se singularizan por la expansión, mientras que las otras retienen su tamaño inicial, que es la longitud de Planck. Entonces esas tres dimensiones espaciales son identificadas con las del escenario cosmológico inflacionario, la evolución posterior al tiempo de Planck resumida en la Figura 14.1 asume el protagonismo, y esas tres dimensiones se expanden hasta alcanzar la forma en que las vemos actualmente.

¿Por qué tres?

Una pregunta inmediata es ¿qué es lo que determina que la reducción de simetría singularice precisamente a tres dimensiones espaciales por lo que respecta a la expansión? Es decir, más allá del hecho experimental de que sólo tres de las dimensiones espaciales se han expandido hasta alcanzar un gran tamaño claramente observable, ¿proporciona la teoría de cuerdas una razón fundamental por la que no se expanden más dimensiones (cuatro, cinco, seis o más), o todas las dimensiones espaciales? Brandenberger y Vafa dieron con una explicación posible. Recordemos que la dualidad radio-pequeño/radio-grande de la teoría de cuerdas se basa en el hecho de que, cuando una dimensión se arrolla circularmente, una cuerda puede envolverla. Brandenberger y Vafa constataron que, como las cintas de goma que envuelven el tubo interior de un neumático de bicicleta, enrollándose alrededor de él, esas cuerdas envolventes tienden a oprimir las dimensiones a las que envuelven, impidiendo su expansión. A primera vista, parece que todas las dimensiones tendrían que verse limitadas por esa opresión, ya que las cuerdas pueden envolver a todas ellas y así lo hacen. La explicación es que, si una cuerda envolvente y su compañera anticuerda (dicho en pocas palabras, una cuerda que envuelve la dimensión en la dirección opuesta) entraran en contacto, se aniquilarían rápidamente la una a la otra, dando como resultado una cuerda *no envuelta*. Si estos procesos suceden con la rapidez y la eficiencia suficientes, una cantidad suficiente de esa limitación u opresión, como de cinta de goma será eliminada, permitiendo que las dimensiones se expandan. Brandenberger y Vafa sugirieron que esta disminución en el efecto de estrangulamiento producido por las cuerdas envolventes tendría lugar sólo en tres de las dimensiones espaciales. Veamos el porqué.

Imaginemos dos partículas puntuales que se desplazan a lo largo de una línea unidimensional tal como la extensión espacial de Línealandia. Salvo que tengan velocidades idénticas, antes o después una de ellas alcanzará a la otra y ambas colisionarán. Obsérvese, sin embargo, que si esas mismas partículas puntuales se desplazan aleatoriamente por un plano bidimensional como la extensión espacial de Planilandia, es probable que nunca colisionen. La segunda dimensión espacial abre un nuevo mundo de trayectorias para cada partícula, la mayoría de las cuales no se cruzarán entre sí en el mismo punto y al mismo tiempo. En tres, cuatro o cualquier número mayor de dimensiones, se hace cada vez más improbable que las dos partículas lleguen a encontrarse. Brandenberger y Vafa constataron que se puede aplicar la misma idea si sustituimos las partículas puntuales por bucles de cuerdas colocados de manera envolvente alrededor de las dimensiones espaciales. Aunque es mucho más difícil de ver, si hay *tres* (o menos) dimensiones espaciales circulares, es probable que dos cuerdas envolventes colisionen entre sí —un caso análogo al que

sucede cuando dos partículas se mueven en una dimensión. Pero en cuatro o más dimensiones espaciales, es menos y menos probable que las cuerdas envueltas colisionen; algo análogo a lo que sucede a las partículas puntuales en dos o más dimensiones espaciales.[130]

Esto nos lleva al esquema que describimos a continuación. En el primer momento del universo, el tumulto generado por la elevada, pero finita, temperatura hace que todas las dimensiones circulares intenten expandirse. Mientras lo hacen, las cuerdas envolventes constriñen la expansión, haciendo que las dimensiones vuelvan a sus radios originales cuyo tamaño era la longitud de Planck. Sin embargo, antes o después, una fluctuación térmica aleatoria hará que tres de las dimensiones crezcan y se hagan de un momento a otro más largas que las otras, y aquí es donde, según hemos explicado, las cuerdas que envuelven estas dimensiones tienen una probabilidad muy grande de colisionar. Alrededor de la mitad de las colisiones afectan a pares cuerda/anticuerda, llevando a aniquilaciones que continuamente aminoran la constricción y permiten que estas tres dimensiones continúen expandiéndose. Cuanto más se expanden, menos probable es que otras cuerdas se enreden alrededor de ellas, ya que una cuerda necesita más energía para enrollarse envolviendo una dimensión de mayor tamaño. De esta manera, resulta que la expansión se alimenta de sí misma, y está cada vez menos limitada a medida que se va haciendo más grande. Ahora podemos imaginarnos que estas tres dimensiones espaciales continúan evolucionando de la manera que hemos descrito en las secciones anteriores y expandiéndose hasta alcanzar un tamaño que es igual de grande o mayor que el universo observable actualmente.

Cosmología y formas de Calabi-Yau

Por simplicidad, Brandenberger y Vafa imaginaron que todas las dimensiones espaciales son circulares. De hecho, como se dijo en el capítulo 8, mientras las dimensiones circulares sean lo suficientemente grandes como para curvarse sobre sí mismas más allá del alcance de nuestra capacidad actual de observación, una forma circular es coherente con el universo que observamos. Pero para las dimensiones que continúen teniendo un tamaño pequeño, es más realista una teoría en la que tomen una forma arrollada dentro de un espacio más intrincado de Calabi-Yau. Por supuesto, la pregunta clave es: ¿en qué espacio de Calabi-Yau? ¿Cómo se determina este espacio particular? Nadie ha sido capaz de responder a estas preguntas. Sin embargo, combinando los drásticos resultados de cambio topológico que explicamos en el

capítulo anterior con estas ideas cosmológicas, podemos sugerir un marco para responder a las preguntas. A través de las transiciones de plegado cónico con rasgado del espacio, sabemos ahora que cualquier forma de Calabi-Yau puede evolucionar convirtiéndose en cualquier otra. Así, podemos imaginarnos que, en los tumultuosos y calientes momentos posteriores al *big bang*, la componente arrollada de Calabi-Yau del espacio sigue siendo pequeña, pero realiza una danza frenética en la que su estructura se escinde y se recompone una y otra vez, llevándonos rápidamente a través de una larga secuencia de formas diferentes de Calabi-Yau. Cuando el universo se enfría y tres de las dimensiones espaciales se hacen grandes, las transiciones de una forma de Calabi-Yau a otra se vuelven más lentas, estabilizándose finalmente las dimensiones adicionales en una forma de Calabi-Yau que, pensando con optimismo, da lugar a las características físicas que observamos en el mundo que nos rodea. El desafío al que se enfrentan los físicos es comprender con detalle la evolución de la componente espacial de Calabi-Yau para que su forma actual se pueda predecir desde principios teóricos. Con la posibilidad, recién descubierta, de que una forma de Calabi-Yau pueda cambiar de manera uniforme para convertirse en otra, vemos que la cuestión de elegir una forma de Calabi-Yau entre las muchas que se barajan, puede realmente reducirse a un problema cosmológico.[131]

¿Y antes del comienzo?

Por no disponer de las ecuaciones exactas de la teoría de cuerdas, Brandenberger y Vafa se vieron obligados a hacer numerosas aproximaciones y suposiciones en sus estudios cosmológicos. Como decía Vafa recientemente:

> Nuestro trabajo revela la nueva manera en la cual la teoría de cuerdas nos permite empezar a expresar algunos problemas persistentes según el planteamiento estándar de la cosmología. Vemos, por ejemplo, que el concepto de singularidad inicial se puede evitar completamente utilizando la teoría de cuerdas. Pero, dadas las dificultades existentes para efectuar unos cálculos totalmente fiables en situaciones tan extremas y con nuestros conocimientos actuales de teoría de cuerdas, nuestro trabajo sólo ofrece un primer vistazo a la cosmología de cuerdas, y está muy lejos de poder decir la última palabra.[132]

Desde la publicación de este trabajo, los físicos han estado realizando continuos

progresos para incrementar los conocimientos relativos a la cosmología de cuerdas, situándose en cabeza, entre otros, Gabriele Veneziano y su colaborador Maurizio Gasperini de la Universidad de Turín. Gasperini y Veneziano aportaron una fascinante versión propia de la cosmología de cuerdas, que comparte ciertas características con la teoría que hemos explicado anteriormente, pero también difiere de ésta en varios aspectos significativos. Al igual que en el trabajo de Brandenberger y Vafa, también se basan en el hecho de que la teoría de cuerdas contempla una longitud mínima con el fin de evitar la temperatura y la densidad energética infinitas que surgen en la teoría cosmológica estándar y en la teoría cosmológica inflacionaria. Pero, en vez de llegar a la conclusión de que esto significa que el universo comienza como una pepita extremadamente caliente y del tamaño de la longitud de Planck, Gasperini y Veneziano sugieren que puede haber toda una *prehistoria* del universo —que comenzaría mucho antes de lo que hemos llamado hasta ahora el instante cero en el tiempo— que llevaría hasta el embrión cósmico planckiano.

En el llamado escenario del *pre big bang*, el universo partió de un estado muy diferente del punto de partida que se fija en el marco del *big bang*. Los trabajos de Gasperini y Veneziano sugieren que el universo, en vez de estar tremendamente caliente y estrechamente enrollado en un punto diminuto del espacio, comenzó como algo frío y, en esencia, *infinito* en su extensión espacial. Las ecuaciones de la teoría de cuerdas indican que —en cierto modo como en la fase inflacionaria descrita por Guth— una inestabilidad irrumpió de golpe, haciendo que cada punto del universo se apartara rápidamente de los demás. Gasperini y Veneziano demostraron que esto hacía que el espacio se volviera cada vez más curvo y daba como resultado un aumento drástico de la temperatura y de la densidad energética.[133] Después de algún tiempo, una región milimétrica bidimensional del espacio que se encontrara *dentro* de esta amplia extensión podría parecer igual que la mancha de enorme calor y densidad que emerge de la expansión inflacionaria de Guth. Entonces, mediante la expansión estándar de la cosmología ordinaria del big bang, esta mancha podía llegar a representar la totalidad del universo que ahora nos resulta familiar. Además, debido a que la época pre big bang tiene su propia expansión inflacionaria, la solución de Guth al problema del horizonte se construye automáticamente en el escenario cosmológico del pre big bang. Como ha dicho Veneziano: «La teoría de cuerdas nos ofrece en bandeja de plata una versión de la cosmología inflacionaria».[134]

El estudio de la cosmología de las supercuerdas se está convirtiendo rápidamente en una arena de investigación activa y fértil. El escenario del pre big bang, por ejemplo, ha generado ya una cantidad significativa de debates calientes y fructíferos, pero está aún lejos de llegar a aclarar qué papel desempeñará en el marco cosmológico que emergerá finalmente de la teoría de cuerdas. La consecución de esos conocimientos cosmológicos dependerá crucialmente, sin duda, de la capacidad de

los físicos para enfrentarse con todos los aspectos de la segunda revolución de las supercuerdas. Por ejemplo, ¿cuáles son las consecuencias cosmológicas de la existencia de branas fundamentales en dimensiones más altas? ¿Cómo cambian las propiedades cosmológicas que hemos explicado, si resulta que la teoría de cuerdas tiene una constante de acoplamiento cuyo valor nos sitúa más cerca del centro de la Figura 12.11, en vez de llevarnos a alguna de las zonas peninsulares? Es decir, ¿cuál es el impacto de una Teoría-M plenamente desarrollada en los primeros momentos del universo? Estas cuestiones fundamentales se están estudiando ahora vigorosamente. Una idea importante ha emergido ya.

Teoría-M y la unión de todas las fuerzas

En la Figura 7.1 mostrábamos cómo las intensidades de los tres acoplamientos no gravitatorios se fusionan entre sí cuando la temperatura del universo es suficientemente alta. ¿Cómo encaja la intensidad de la fuerza gravitatoria en todo esto? Antes de aparecer la Teoría-M, los especialistas en teoría de cuerdas podían demostrar que, con la elección más sencilla de la componente de Calabi-Yau del espacio, la fuerza gravitatoria casi, aunque no del todo, se fusiona con las otras tres, como se muestra en la Figura 14.2. Los especialistas en teoría de cuerdas descubrieron que el desencaje se podía evitar, entre otros trucos, modelando la forma del espacio de Calabi-Yau elegido, pero ese ajuste fino posterior a los hechos siempre hace que los físicos se sientan incómodos. Dado que actualmente nadie conoce un método para predecir la forma precisa de las dimensiones de Calabi-Yau, parece peligroso basarse en algunas soluciones de problemas, si estas soluciones dependen tan delicadamente de los finos detalles de su forma.

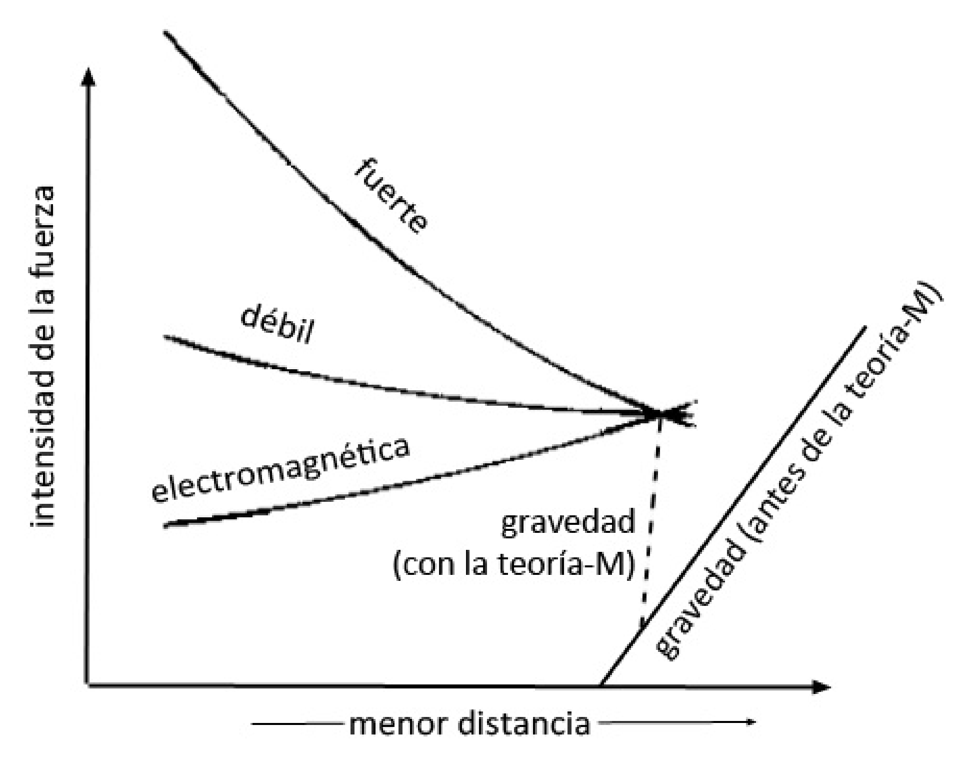


Figura 14.2 Dentro de la Teoría-M, las intensidades de las cuatro fuerzas pueden fusionarse de manera natural.

Sin embargo, Witten ha demostrado que la segunda revolución de las supercuerdas proporciona una solución mucho más robusta. Investigando cómo varían las intensidades de las fuerzas cuando la constante de acoplamiento de las cuerdas no es necesariamente pequeña, Witten descubrió que se puede darle un pequeño codazo a la curva de la fuerza gravitatoria para lograr que se fusione con las otras fuerzas, como en la Figura 14.2, sin ningún remodelado especial de la porción del espacio de Calabi-Yau. Aunque es demasiado pronto para decirlo, esto puede indicar que la unidad cosmológica se consigue más fácilmente utilizando el marco más amplio de la Teoría-M.

Los procedimientos que se han discutido en esta sección y en las anteriores representan los primeros pasos, en cierto modo pasos de tanteo, hacia el conocimiento de las implicaciones cosmológicas de la teoría de cuerdas y la Teoría-M. Durante los próximos años, a medida que se vayan perfeccionando las herramientas no perturbativas, de la teoría de cuerdas y de la teoría M, los físicos pronostican que algunas de las ideas más profundas surgirán de la aplicación de estas teorías a las cuestiones cosmológicas.

Pero al no disponer actualmente de métodos suficientemente potentes para comprender en su totalidad la cosmología aplicando la teoría de cuerdas, vale la pena reflexionar sobre algunas consideraciones generales concernientes al posible papel de la cosmología en la búsqueda de la teoría última. Advertimos de que algunas de estas ideas son de una naturaleza más especulativa que muchas de las que hemos comentado anteriormente, pero plantean temas de los que cualquier teoría

supuestamente final podrá tener que hablar algún día.

Especulación Cosmológica y la teoría definitiva

La cosmología tiene la capacidad de captar nuestra atención a un nivel profundo y visceral, porque comprender cómo comenzó todo es —al menos para algunos— el punto en el que podemos encontramos más cerca de comprender *por qué* empezó. Esto no significa que la ciencia moderna proporcione una conexión entre la cuestión del «cómo» y la del «por qué» —de hecho, no la proporciona— y es muy probable que nunca se descubra dicha conexión. Pero el estudio de la cosmología sostiene la promesa de ofrecernos el más completo conocimiento de la arena del por qué —el nacimiento del universo— y esto nos permite al menos tener una visión científicamente informada del marco dentro del cual se plantean los interrogantes. A veces, el hecho de alcanzar la más profunda familiaridad con una pregunta es el mejor sustituto de la posibilidad de tener realmente la respuesta.

En el contexto de la búsqueda de la teoría definitiva, estas elevadas reflexiones sobre la cosmología dan paso a unas consideraciones mucho más concretas. El modo en que las cosas se presentan ante nosotros en el universo actualmente —un modo que se puede observar en el extremo de la derecha de la línea del tiempo en la Figura 14.1— depende con toda seguridad de las leyes fundamentales de la física, pero también puede depender de ciertos aspectos de la evolución cosmológica, desde el extremo de la izquierda en la línea del tiempo, que potencialmente están fuera del alcance inclusive de la teoría más profunda.

No es difícil imaginarse cómo podría ser esto. Pensemos en lo que sucede, por ejemplo, cuando se lanza una pelota al aire. Las leyes de la gravedad gobiernan el movimiento de la pelota, pero no podemos predecir dónde aterrizará la pelota utilizando exclusivamente estas leyes. Tenemos que conocer también la velocidad de la pelota —el valor numérico y la dirección de esta velocidad— cuando sale de la mano que la lanza. Es decir, necesitamos conocer las *condiciones iniciales* del movimiento de la pelota. De una manera similar, existen características del universo que tienen también una contingencia histórica; la razón por la que una estrella se forma aquí o un planeta allí depende de una complicada cadena de sucesos que, al menos en principio, podemos imaginar que indican retrospectivamente alguna característica de cómo era el universo cuando empezó todo. Pero es posible que, incluso más características del universo, quizá incluso las propiedades de la materia fundamental y de las partículas de fuerza tengan también una dependencia directa de

la evolución histórica —evolución que en sí misma también depende de las condiciones iniciales del universo—.

De hecho, ya hemos indicado una posible plasmación de esta idea en la teoría de cuerdas: cuando el caliente universo primitivo evolucionó, las dimensiones adicionales pudieron haber sufrido una transmutación de una forma a otra, estableciéndose finalmente como un espacio concreto de Calabi-Yau una vez que la materia se hubo enfriado lo suficiente. Pero, como sucede con una pelota lanzada al aire, el resultado de este viaje a través de numerosas formas de Calabi-Yau puede depender con gran probabilidad de ciertos detalles relativos al modo en que ese viaje comenzó en el primer lugar. Y a través de la influencia de la forma resultante de Calabi-Yau en las masas de partículas y en las propiedades de las fuerzas, vemos que la evolución cosmológica y el estado del universo en sus comienzos pueden tener un profundo impacto en las propiedades físicas que observamos actualmente.

No sabemos cuáles fueron las condiciones iniciales del universo, ni siquiera las ideas, los conceptos y el lenguaje que se debería usar para describirlas. Creemos que ese tremendo estado inicial de energía, densidad y temperatura *infinitas* que surge en el modelo cosmológico estándar y en el inflacionario es más una señal de que estas teorías se han derrumbado, que una descripción correcta de las condiciones físicas que existen realmente. La teoría de cuerdas ofrece algo mejor, ya que demuestra cómo se pueden evitar estos extremos infinitos; sin embargo, nadie tiene ni idea sobre la cuestión de cómo empezó todo realmente. De hecho, nuestra ignorancia persiste en un plano aún más elevado: no sabemos ni siquiera si es coherente plantear la pregunta relativa a determinar las condiciones iniciales o si es una pregunta que está para siempre más allá del alcance de cualquier teoría, como lo estaría el pedir a la relatividad general que nos aclarase con qué fuerza hemos lanzado una pelota al aire. Intentos audaces realizados por Hawking y James Hartle de la Universidad de California en Santa Bárbara han intentado traer la cuestión de las condiciones iniciales del cosmos al dominio de la teoría física, pero ninguno de estos intentos ha llegado a conclusión alguna. En el contexto de la teoría de cuerdas/Teoría-M, nuestros conocimientos cosmológicos son, por ahora, demasiado primitivos para determinar si nuestra ansiada «teoría del todo» realmente hace honor a su nombre y establece su propia versión de las condiciones iniciales, elevándolas así a la categoría de ley física. Ésta es una cuestión primordial para posteriores investigaciones.

Pero incluso más allá de la cuestión de las condiciones iniciales y de su impacto en los subsiguientes giros y vueltas de la evolución cósmica, algunas propuestas recientes altamente especulativas han argumentado a favor de la existencia de otros límites potenciales añadidos que podría tener el poder explicativo de cualquier teoría definitiva. Nadie sabe si estas ideas son acertadas o equivocadas, pero ciertamente se encuentran en la actualidad en las afueras de la corriente principal de la ciencia. Sin

embargo, ponen de manifiesto —aunque de una manera bastante provocativa y especulativa— un obstáculo con el que se puede encontrar cualquier teoría final definitiva que se proponga.

La idea básica se basa en la siguiente posibilidad. Supongamos que lo que llamamos *el* universo es en realidad sólo una pequeñísima parte de una extensión cosmológica mucho más grande, un universo que forma parte del enorme número de universos-islas que están dispersos por todo un enorme archipiélago cosmológico. Aunque esto podría sonar bastante exagerado —y, al fin y al cabo, puede que lo sea —, André Linde ha sugerido un mecanismo concreto que podría conducir a la idea de este universo gigantesco. Linde ha descubierto que el breve pero crucial estallido de expansión inflacionaria, comentado anteriormente, puede no haber sido un suceso único que se produjera una sola vez. Al contrario, según afirma, las condiciones para una expansión inflacionaria pueden producirse de manera repetida en regiones aisladas diseminadas por todo el cosmos, que experimentarían su propio hinchamiento inflacionario, aumentando así de tamaño, y evolucionando hasta convertirse en nuevos universos separados. Y en cada uno de estos universos, el proceso continuaría, de tal forma que brotarían desde regiones remotas, generando una red interminable de expansiones cósmicas con sus respectivos procesos inflacionarios. La terminología se vuelve un poco farragosa, pero sigamos la moda actual y llamemos a este concepto enormemente expandido del universo el *multiverso*, denominando universo a cada una de sus partes constituyentes.

La cuestión central es que, mientras en el capítulo 7 observamos que todos nuestros conocimientos apuntan hacia la existencia de unas propiedades físicas coherentes y uniformes a lo largo y ancho de todo el universo, es posible que esto no tenga fundamento en los atributos físicos de estos otros universos, ya que se encuentran separados de nosotros o, al menos, tan alejados que su luz no tiene tiempo para alcanzarnos. Por lo tanto, podemos suponer que las propiedades físicas varían de un universo a otro. En algunos universos, esas diferencias pueden ser sutiles: por ejemplo, la masa del electrón o la intensidad de la fuerza nuclear fuerte podrían ser una milésima de un uno por ciento mayores o menores que en nuestro universo. En otros, las propiedades físicas pueden diferir de un modo más pronunciado: el quark arriba podría pesar diez veces lo que pesa en nuestro universo, o la intensidad de la fuerza electromagnética podría ser diez veces el valor que nosotros medimos, con todas las profundas implicaciones que esto tendría sobre las estrellas y sobre la vida tal como la conocemos (según lo indicado en el capítulo 1). Y en otros universos las propiedades físicas pueden diferir aún más drásticamente: la lista de las partículas elementales y de las fuerzas podría ser completamente diferente de la nuestra, o, por poner un ejemplo de la teoría de cuerdas, incluso el número de dimensiones extendidas podría variar en el caso de algunos universos que estuvieran comprimidos

por tener sólo una dimensión espacial grande, o incluso ninguna, mientras que otros universos podrían estar expandidos por tener ocho, nueve o incluso diez dimensiones espaciales extendidas. Si dejamos correr libremente la imaginación, incluso las propias leyes de la física podrían diferir drásticamente de un universo a otro. La variedad de posibilidades es infinita.

Ésta es la cuestión. Si exploramos por todo este enorme laberinto de universos, la gran mayoría de ellos no tendrán las condiciones adecuadas para albergar la vida, o al menos para cualquier cosa que sea tan sólo remotamente parecida a lo que conocemos como vida. En el caso de cambios drásticos en las propiedades físicas que conocemos, está claro: si nuestro universo fuera realmente como el universo de la manguera de jardín, la vida no existiría tal como la conocemos nosotros. Pero, incluso aunque fueran unos cambios en las propiedades físicas bastante conservadores, dichos cambios interferirían, por ejemplo en la formación de las estrellas, perturbando su capacidad de actuar como hornos cósmicos que sintetizan los átomos de unos elementos que son la base de la vida, tales como el carbono y el oxígeno, que normalmente son expelidos a través de todo el universo en las explosiones de las supernovas. Teniendo en cuenta la gran dependencia de la vida con respecto a las particularidades de la física, si ahora nos preguntamos, por ejemplo, por qué las fuerzas y las partículas de la naturaleza tienen esas propiedades concretas que nosotros observamos, surge una posible respuesta: en un recorrido de todo el multiverso, esas características varían ampliamente; sus propiedades *pueden* ser diferentes y *son* diferentes en otros universos. Lo que es especial en la combinación concreta de propiedades de partículas y fuerzas que observamos es, de un modo claro, que permiten que se forme la vida. Y la vida, en particular la vida inteligente, es un requisito previo incluso para plantearse la pregunta de por qué nuestro universo tiene las propiedades que tiene. En lenguaje llano, las cosas son como son en nuestro universo porque, si no lo fueran, no estaríamos aquí para enterarnos. Como los ganadores en una ruleta rusa masiva, cuya sorpresa por sobrevivir se moderaría al darse cuenta de que, si no hubieran ganado, no habrían sido capaces de sentirse sorprendidos, asimismo la hipótesis del multiverso tiene el efecto de moderar nuestra insistencia en explicar por qué nuestro universo es como es.

Esta línea de argumentación es una versión de una idea que tiene ya una larga historia y que se conoce como el *principio antrópico*. Tal como se expone, se trata de una perspectiva diametralmente opuesta al sueño de una teoría unificada, rígida y que lo puede explicar todo, en la cual las cosas son como son porque el universo no puede ser de otra manera. En vez de ser el epítome de una elegancia poética en la que todo encaja con una elegancia inflexible, el multiverso y el principio antrópico describen un panorama en el que se ve un conjunto salvajemente excesivo de universos cuyo apetito por la variedad es insaciable. Será extremadamente difícil, si no imposible,

para nosotros, saber si la idea del multiverso es correcta. Incluso si existen otros universos, podemos suponer que nunca entraremos en contacto con ninguno de ellos. Pero, aumentando considerablemente la idea de «que hay ahí fuera» —de una manera que empequeñece la constatación del Hubble de que la Vía Láctea no es más que una galaxia entre otras muchas— el concepto de multiverso al menos nos alerta ante la posibilidad de que podemos estar pidiéndole demasiado a lo que sería una teoría definitiva.

Deberíamos exigir que nuestra teoría definitiva diera una descripción de todas las fuerzas y toda la materia que fuera coherente desde el punto de vista de la mecánica cuántica. Deberíamos exigir que nuestra teoría definitiva ofreciera una cosmología convincente dentro de nuestro universo. Sin embargo, si es correcta la teoría del multiverso —lo cual ya es una suposición muy fuerte— *puede* que sea demasiado pedir que nuestra teoría explique también cada una de las propiedades de las masas de las partículas, cargas e intensidad de las fuerzas.

Pero debemos enfatizar que, incluso si aceptamos la premisa especulativa del multiverso, la conclusión de que esto compromete nuestro poder de predicción está lejos de ser consistente. La razón, dicho de una forma sencilla, es que, si damos rienda suelta a nuestra imaginación y nos permitimos contemplar un multiverso, deberíamos también liberar nuestras reflexiones teóricas y contemplar los modos en que se puede domesticar la aparente aleatoriedad del multiverso. En una reflexión relativamente conservadora, podemos suponer que —si la idea del multiverso fuera cierta— seríamos capaces de ampliar nuestra teoría definitiva hasta llegar a su expansión completa, y que nuestra «teoría extensa definitiva» podría decimos con precisión por qué y cómo los valores de los parámetros fundamentales están diseminados por todos los universos constituyentes.

Hay una reflexión más radical que viene de una propuesta de Lee Smolin de la *Penn State University*, el cual, inspirado por la similitud entre las condiciones en el momento del *big bang* y las del centro de los agujeros negros —estando cada uno de ellos caracterizado por la densidad colosal de la materia comprimida—, ha sugerido que todo agujero negro es la semilla de un nuevo universo que irrumpe en la existencia mediante un explosión similar a la del *big bang*, pero está escondido de nuestra vista por el horizonte de sucesos del agujero negro. Además de proponer otro mecanismo para generar un multiverso, Smolin ha introducido un nuevo elemento —una versión cósmica de la mutación genética— que acaba con algunas limitaciones científicas asociadas con el principio antrópico.[135] Smolin proponía que imagináramos que, cuando un universo surge del centro de un agujero negro, sus atributos físicos, tales como la masas de las partículas y las intensidades de las fuerzas, son parecidos, pero no idénticos, a los del universo de al lado. Dado que los agujeros negros se originan a partir de estrellas extinguidas, y que la formación de

una estrella depende de los valores precisos de las masas de las partículas y las intensidades de las fuerzas, la fecundidad de cualquier universo dado —el número de agujeros negros que puede producir— depende en gran medida de estos parámetros. Unas pequeñas variaciones en los parámetros de los universos generados conducirán por lo tanto a unos valores que están incluso más optimizados para la producción de agujeros negros que los del universo generador, y tendrán un número aún mayor de universos generados a su vez por ellos.[136] Después de muchas «generaciones», los descendientes de esos universos optimizados para producir agujeros negros llegarán así a ser tan numerosos que predominarán en la población del multiverso. Por lo tanto, en vez de invocar el principio antrópico, la sugerencia de Smolin proporciona un mecanismo dinámico que, por término medio, hace que los parámetros de cada universo de la generación siguiente estén cada vez más cerca de unos valores particulares —los que son óptimos para la producción de agujeros negros—.

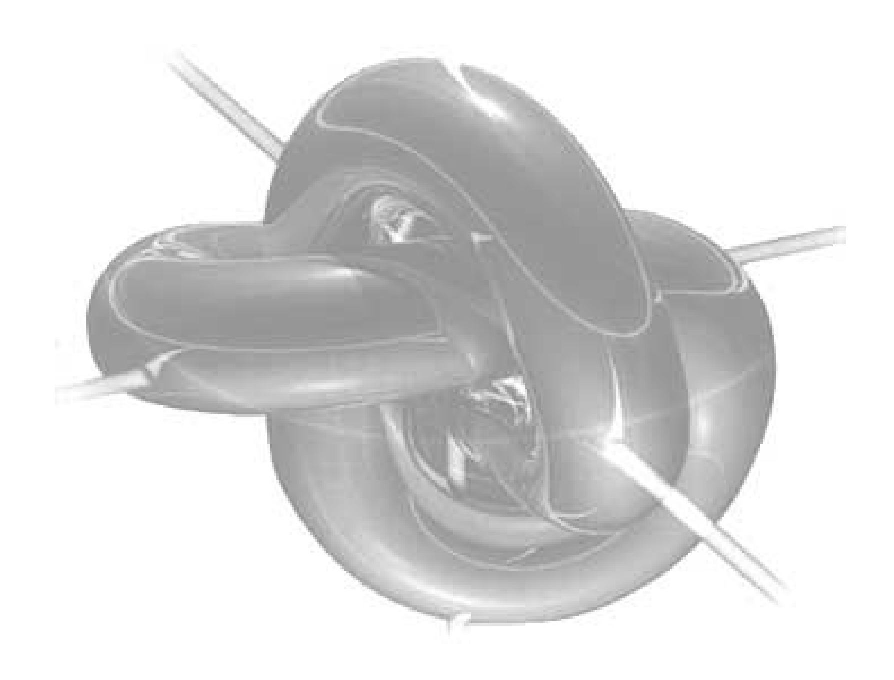
Este planteamiento aporta otro método, también en el contexto del multiverso, en el que se pueden explicar los parámetros de la materia fundamental y de las fuerzas. Si la teoría de Smolin es correcta, y si somos parte de un típico miembro de un multiverso maduro (estos condicionales son muy fuertes y, por supuesto, se pueden discutir desde muchos frentes), los parámetros de las partículas y las fuerzas que midamos habrán de estar optimizados para la producción de agujeros negros. Es decir, cualquier modificación de estos parámetros de nuestro universo haría más difícil que se formaran agujeros negros. Los físicos han comenzado a investigar esta predicción; actualmente no hay consenso sobre su validez. Pero, incluso si la propuesta específica de Smolin resulta estar equivocada, presenta a pesar de todo otra forma que la teoría definitiva podría adoptar. La teoría definitiva puede, a primera vista, aparentar una falta de rigor. Podemos pensar que sirve para describir una gran cantidad de universos, la mayoría de los cuales no tienen nada que ver con el que habitamos. Además, podemos suponer que todos estos universos pueden estar ya configurados físicamente, con lo que tendríamos un multiverso —algo que, a primera vista, limita para siempre nuestro poder de predicción—. Sin embargo, de hecho, esta discusión pone de manifiesto que todavía se puede lograr una explicación definitiva, siempre y cuando aprovechemos, no sólo las leyes definitivas, sino también sus implicaciones para la evolución cosmológica a una escala inesperadamente enorme.

Indudablemente, las implicaciones cosmológicas de la teoría de cuerdas/Teoría-M constituirán un importante campo de investigación cuando ya estemos bien entrados en el siglo XXI. Sin contar con aceleradores de partículas capaces de producir energías a la escala de Planck, tendremos que basarnos cada vez más en ese acelerador cosmológico que es el *big bang*, y en los restos que nos ha dejado por todo el universo, como datos experimentales que podremos utilizar. Con suerte y perseverancia, podremos finalmente ser capaces de dar respuesta a interrogantes tales

como el modo en que comenzó el universo, y por qué ha evolucionado de la forma que percibimos en la tierra y en los cielos. Desde luego, hay todavía mucho territorio inexplorado entre el punto en el que estamos ahora y el lugar en el que están las respuestas completas a esas preguntas fundamentales. Pero el desarrollo de una teoría cuántica de la gravedad mediante la teoría de las supercuerdas da credibilidad a la esperanza de poseer ya actualmente las herramientas teóricas necesarias para avanzar por amplias regiones de lo desconocido y para, sin duda, después de mucho luchar, aparecer posiblemente con las respuestas a algunas de las preguntas más profundas que se han planteado jamás.

Parte V

Unificación en el siglo XXI



Capítulo 15

Perspectivas

Dentro de algunos siglos, la teoría de las supercuerdas, o su evolución dentro de la Teoría-M, habrá podido desarrollarse hasta situarse tan lejos de su formulación actual, que podría ser irreconocible incluso para los más avanzados investigadores de hoy en día. En el proceso continuo de búsqueda de la teoría definitiva, es muy posible que encontremos que la teoría de cuerdas no es sino uno de los muchos pasos decisivos en el camino hacia una concepción mucho más grande del cosmos, una concepción que involucra ideas que difieren radicalmente de cualquier cosa que hayamos encontrado con anterioridad. La historia de la ciencia nos enseña que, cada vez que pensamos que hemos comprendido todo, la naturaleza nos tiene reservada una sorpresa radical que requiere unos cambios significativos, y a veces drásticos, en el modo en que pensamos cómo funciona el mundo. Entonces de nuevo, con algo de presunción arrogante, también podemos suponer, como otros lo han hecho quizá ingenuamente antes que nosotros, que estamos viviendo un período crucial de la historia de la humanidad, en el que la búsqueda de las leyes definitivas del universo nos conducirá finalmente a terminar la tarea. Como ha dicho Edward Witten:

> Creo que estamos tan cerca con la teoría de cuerdas que —en mis momentos de mayor optimismo— me imagino que algún día la forma final de esta teoría podría caer del cielo e ir a parar a las manos de alguien. Sin embargo, cuando soy más realista, siento que nos encontramos actualmente en el proceso de construir una teoría mucho más profunda que cualquiera que hayamos tenido anteriormente, y que bien entrado el siglo XXI, cuando yo sea demasiado viejo para tener alguna idea útil al respecto, los físicos más jóvenes tendrán que decidir si hemos encontrado en efecto la teoría final.[137]

Aunque todavía estamos sintiendo las sacudidas posteriores al terremoto de la segunda revolución de las supercuerdas y absorbiendo la panoplia de nuevas ideas

que esta revolución ha engendrado, la mayoría de los especialistas en teoría de cuerdas coinciden en que probablemente será necesaria una tercera, y probablemente una cuarta revolución teórica por el estilo para que se libere todo el potencial de la teoría de cuerdas y se compruebe su posible carácter de teoría final. Como hemos visto, la teoría de cuerdas ya ha dibujado un extraordinario nuevo esquema del funcionamiento del universo, pero quedan obstáculos importantes y cabos sueltos que sin duda serán el foco de atención prioritario para los especialistas en teoría de cuerdas en el siglo XXI. Por lo tanto, en este último capítulo no podremos contar cómo acaba el cuento de la búsqueda de la humanidad de las leyes más profundas del universo, porque la búsqueda continúa. En cambio, dirigiremos nuestra mirada hacia el futuro de la teoría de cuerdas, discutiendo cinco cuestiones centrales con las que se enfrentarán los expertos en teoría de cuerdas en su búsqueda de la teoría definitiva.

¿Cuál es el principio fundamental que subyace en la teoría de cuerdas?

Una lección general que hemos aprendido durante los últimos cien años es que las leyes conocidas de la física están asociadas con los principios de simetría. La relatividad especial está basada en la simetría encarnada en el principio de relatividad, la simetría existente entre todos los puntos de observación que tienen velocidad constante. La fuerza de la gravedad, en la medida en que está incorporada en la teoría general de la relatividad, está basada en el principio de equivalencia —la extensión del principio de relatividad para abarcar todos los posibles putos de observación independientemente de la complejidad de sus estados de movimiento—. Y las fuerzas nucleares fuerte y débil, así como la fuerza electromagnética, están basadas en los más abstractos principios de simetría gauge.

Los físicos, como ya hemos comentado anteriormente, tienden a elevar los principios de simetría a una posición predominante poniéndolos directamente en el pedestal de la explicación. Según este punto de vista, la gravedad *existe* con el fin de que todos los puntos posibles de observación estén en completa igualdad de condiciones, es decir, de tal modo que se sostenga el principio de equivalencia. De manera similar, las fuerzas no gravitatorias *existen* con el fin de que la naturaleza respete las simetrías gauge que llevan asociadas. Por supuesto, este planteamiento transforma la pregunta sobre la razón por la que una cierta fuerza existe, en la pregunta de por qué la naturaleza respeta el principio de simetría que la fuerza tiene asociado. Pero esto ciertamente se siente como un progreso, especialmente cuando la

simetría en cuestión parece eminentemente natural. Por ejemplo, ¿por qué habría que tratar el marco de referencia de un observador de una forma diferente a como se trata el de otro? Parece mucho más natural que las leyes del universo traten todos los puntos de observación de igual manera; esto se consigue mediante el principio de equivalencia y la introducción de la gravedad en la estructura del cosmos. Aunque son necesarios algunos conocimientos matemáticos para apreciarlo plenamente, como dijimos en el capítulo 5, hay un razonamiento similar con las simetrías gauge en las que se apoyan las tres fuerzas no gravitatorias.

También la teoría de cuerdas nos permite bajar un talle en la escala de la profundidad de la explicación, porque todos estos principios de simetría, así como otro —la supersimetría— emergen de su estructura. De hecho, si la historia hubiera seguido un derrotero diferente —y los físicos hubieran descubierto la teoría de cuerdas unos cien años antes— podemos suponer que estos principios de simetría habrían sido descubiertos estudiando sus propiedades. Pero, tengamos en cuenta que mientras el principio de equivalencia nos proporciona una cierta comprensión de por qué la gravedad existe, y las simetrías gauge nos aportan alguna idea sobre la razón por la que existen las fuerzas no gravitatorias, en el contexto de la teoría de cuerdas estas simetrías son *consecuencias*; aunque su importancia no disminuye de ningún modo, son parte del producto final de una estructura teórica mucho mayor.

Esta discusión trae a primer plano la siguiente pregunta: ¿es la misma teoría de cuerdas una consecuencia inevitable de algún principio más amplio —posiblemente, pero no necesariamente, algún principio de simetría— casi del mismo modo que el principio de equivalencia conduce inexorablemente a la relatividad general o las simetrías gauge conducen a las fuerzas no gravitatorias? En el momento de escribir esto, nadie tiene idea de cómo responder a esta pregunta. Para apreciar su importancia, basta con que nos imaginemos a Einstein intentando formular la relatividad general sin haber tenido la feliz idea que se le ocurrió en la oficina de patentes de Berna en 1907 y que le llevó al principio de equivalencia. No habría sido imposible formular la relatividad general sin haber tenido previamente esta idea clave, pero ciertamente habría sido extraordinariamente difícil. El principio de equivalencia proporciona un marco organizativo sucinto, sistemático y poderoso para analizar la fuerza de la gravedad. La explicación sobre la relatividad general que dimos en el capítulo 3, por ejemplo, se basaba fundamentalmente en el principio de equivalencia, y el papel de éste en todo el formalismo matemático de la teoría es aún más crucial.

Actualmente, los especialistas en teoría de cuerdas están en una posición análoga a la de un Einstein privado del principio de equivalencia. Desde la genial intuición de Veneciano en el año 1968, la teoría se ha ido ensamblando pieza por pieza, descubrimiento por descubrimiento, revolución por revolución. Pero falta todavía un

principio organizativo central que abarque todos estos descubrimientos y todas las demás características de esta teoría dentro de un marco sistemático que lo englobe todo —un marco que haga absolutamente inevitable la existencia de cada ingrediente individual—. El descubrimiento de este principio marcaría un momento decisivo en el desarrollo de la teoría de cuerdas, ya que probablemente pondría de manifiesto el funcionamiento interno de dicha teoría con una claridad insospechada. Desde luego, no hay garantía de que exista este principio fundamental, pero la evolución de la física durante los últimos cien años anima a los especialistas en teoría de cuerdas a mantener altas esperanzas de que lo haya. Con vistas a desarrollar la fase siguiente de la teoría de cuerdas, el descubrimiento de su «principio de inevitabilidad» —esa idea subyacente a partir de la cual surge necesariamente toda la teoría— es de la más alta prioridad.[138]

¿Qué son realmente el espacio y el tiempo? ¿Nos las podríamos arreglar sin ellos?

En muchos de los capítulos anteriores hemos utilizado libremente los conceptos de espacio y de espacio-tiempo. En el capítulo 2 hablábamos de cómo Einstein constató que el espacio y el tiempo están inextricablemente entretejidos por el hecho inesperado de que el movimiento de un objeto a través del espacio tiene influencia en su paso a través del tiempo. En el capítulo 3, profundizamos nuestros conocimientos sobre el papel que desempeña el espacio-tiempo en el despliegue del cosmos a través de la relatividad general, que muestra que la forma detallada de la estructura del espacio-tiempo transmite la fuerza de la gravedad de un lugar a otro. Las violentas ondulaciones cuánticas que tienen lugar en la contextura microscópica de dicha estructura, como se explicó en los capítulos 4 y 5, establecían la necesidad de una nueva teoría, llevándonos a la teoría de cuerdas. Y, por fin, en varios de los capítulos siguientes hemos visto cómo la teoría de cuerdas afirma que el universo tiene muchas más dimensiones que las que conocemos, estando algunas de ellas arrolladas en formas diminutas, pero complicadas, que pueden experimentar maravillosas transformaciones en las que su estructura se pincha, se rasga y luego se repara por sí misma.

Mediante representaciones gráficas como las de las Figuras 3.4, 3.6 y 8.10, hemos intentado ilustrar esas ideas, visualizando la estructura del espacio y del espacio-tiempo como si fueran algo parecido a un trozo de tejido con el cual se confecciona el universo. Estas imágenes tienen un potencial explicativo considerable; las utilizan

habitualmente los físicos como una guía visual en su propio trabajo técnico. Aunque la contemplación de figuras tales como las que hemos mencionado va dando una idea gradual de su significado, puede quedar aún planteada la pregunta: ¿qué queremos decir realmente cuando mencionamos la estructura del universo?

Se trata de una pregunta profunda que, de una forma u otra, ha sido objeto de debate durante cientos de años. Newton declaró que el espacio y el tiempo eran constituyentes eternos e inmutables de la configuración del cosmos, prístinas estructuras que están más allá de los límites de las preguntas y las explicaciones. Como escribió en los *Principia*: «El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre similar e inamovible. El tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin relación con nada que sea externo».[139] Gottfried Leibniz y otros discreparon a voz en grito, proclamando que el espacio y el tiempo son meros instrumentos de contabilidad para resumir convenientemente las relaciones entre objetos y eventos dentro del universo. La ubicación de un objeto en el espacio y en el tiempo tiene significado sólo en comparación con la de otro objeto. El espacio y el tiempo son el vocabulario para estas relaciones, pero nada más. Aunque el punto de vista de Newton —justificado por sus tres leyes del movimiento, que tuvieron éxito experimentalmente— predominó durante más de doscientos años, la concepción de Leibniz, desarrollada posteriormente por el físico austríaco Ernst Mach, está mucho más cerca de nuestra visión actual. Como ya hemos visto, las teorías especial y general de la relatividad de Einstein desplazaron totalmente la idea de una noción absoluta y universal del espacio y del tiempo. Pero todavía podemos preguntarnos si el modelo geométrico del espacio-tiempo que desempeña un papel tan decisivo en la relatividad general y en la teoría de cuerdas es únicamente un sistema taquigráfico para expresar las relaciones espaciales y temporales entre distintas ubicaciones, o si deberíamos vernos a nosotros mismos como si verdaderamente estuviéramos incrustados en *algo* cuando nos referimos a nuestra inmersión dentro de la estructura del espacio-tiempo.

Aunque estamos entrando en territorio especulativo, la teoría de cuerdas sugiere una respuesta para esta pregunta. El gravitón, el paquete más pequeño de fuerza gravitatoria, es un patrón particular de vibración de cuerdas. Y del mismo modo que un campo electromagnético tal como la luz visible está compuesto por un número enorme de fotones, un campo gravitatorio está formado por un número enorme de gravitones, es decir, un número enorme de cuerdas que ejecutan el patrón vibratorio del gravitón. Los campos gravitatorios, a su vez, están codificados en la curvatura de la estructura del espacio-tiempo, lo que nos lleva a identificar la misma estructura del espacio-tiempo con una cantidad colosal de cuerdas que experimentan todas ellas el mismo, metódico, patrón de vibración del gravitón. En el lenguaje técnico, esta

colección enorme y organizada de cuerdas que vibran de un modo similar se conoce como un *estado coherente* de las cuerdas. Se trata de una imagen bastante poética — las cuerdas de la teoría de cuerdas como los hilos de la estructura del espacio-tiempo — pero hemos de observar que su significado riguroso tiene todavía que desarrollarse completamente.

No obstante, la descripción de la estructura del espacio-tiempo en esta forma de cuerdas entretejidas nos lleva a considerar la cuestión siguiente. Una porción ordinaria de estructura textil es el producto final de un meticuloso entretejido de hilos, siendo estos hilos la materia prima de la tela. Similarmente, nos podemos preguntar si existe una materia prima para la estructura del espacio-tiempo —una configuración de las cuerdas del tejido cósmico, en el que dichas cuerdas aún no se han coaligado en la forma organizada que reconocemos como espacio-tiempo—. Obsérvese que hay algo de imprecisión en representar este estado como una masa embrollada de cuerdas vibratorias que aún no se han entretejido a sí mismas en un todo ordenado porque, en nuestra forma habitual de pensar, esto presupone una noción del espacio y del tiempo —el espacio en el que una cuerda vibra y la progresión en el tiempo que nos permite seguir estos cambios de forma de un momento al siguiente—. Sin embargo, en el estado de materia prima, antes de que las cuerdas que forman la estructura cósmica inicien la danza vibratoria coherente y ordenada que estamos discutiendo, *no hay ninguna comprensión del espacio ni del tiempo*. Inclusive nuestro lenguaje es demasiado burdo para manejar estas ideas, porque, de hecho, no existe ni siquiera la noción de *antes*. En cierto modo, es como si las cuerdas fueran «fragmentos» del espacio y el tiempo, y sólo cuando realizan adecuadamente unas vibraciones simpáticas, emergen las nociones convencionales de espacio y tiempo.

Imaginar un estado primario y sin estructura como éste, en el que no existen las nociones de espacio ni de tiempo tal como las conocemos, hace que el poder de comprensión de la mayoría de las personas llegue al límite (ciertamente, el mío llega). Como la anécdota de Stephen Wright sobre el fotógrafo que está obsesionado con tomar un primer plano del horizonte, chocamos con una contradicción de paradigmas cuando intentamos imaginar un universo que *existe*, pero que de alguna forma no contempla los conceptos de espacio y tiempo. Sin embargo, es probable que necesitemos avenirnos con tales ideas y comprender su implementación para poder llegar después a valorar en su totalidad la teoría de cuerdas. La razón es que nuestra actual formulación de la teoría de cuerdas presupone la existencia del espacio y del tiempo dentro de los cuales las cuerdas (y los demás constituyentes descubiertos en la Teoría-M) se desplazan y vibran. Esto nos permite deducir las propiedades físicas de la teoría de cuerdas en un universo que tiene una dimensión temporal, un cierto número de dimensiones espaciales extendidas (que habitualmente se reducen a tres) y

unas dimensiones adicionales que están arrolladas en alguna de las formas que permiten las ecuaciones de la teoría. Pero esto es, en cierto modo, como valorar el talento creativo de una pintora poniéndola a pintar en un juego de dibujar siguiendo los números. Indudablemente, la artista añadirá un toque personal aquí y allí, pero, al limitar tan estrechamente el formato de su obra, nos limitamos nosotros mismos a no poder tener más que una visión estrecha de su capacidad. Similarmente, dado que el triunfo de la teoría de cuerdas es su incorporación natural de la mecánica cuántica y la gravedad, y puesto que la gravedad está ligada a la forma del espacio y del tiempo, no deberíamos limitar a la teoría obligándola a operar dentro de un marco ya existente del espacio— tiempo. Al contrario, del mismo modo que debemos permitir a nuestra artista que trabaje sobre un lienzo en blanco, deberíamos permitir a la teoría de cuerdas que *cree* su propio arena del espacio— tiempo, partiendo de una configuración sin espacio y sin tiempo.

La esperanza que tenemos es que a partir de este punto inicial que es como una pizarra limpia —probablemente en una época anterior al *big bang* o al pre big bang (si es que podemos usar expresiones temporales, por falta de otro marco lingüístico) — la teoría describirá un universo que evoluciona hacia una forma en la cual emerge un fondo de vibraciones coherentes de cuerdas, produciendo las nociones convencionales de espacio y tiempo. Si se constata un marco así, esto indicaría que el espacio, el tiempo y, por asociación, la dimensión, no son elementos esenciales para la definición del universo. Más bien son conceptos prácticos que emergen de un estado más básico, atávico y primario.

Las investigaciones de punta sobre diversos aspectos de la Teoría-M, llevadas a cabo por Stephen Shenker, Edward Witten, Tom Banks, Willy Fischler, Leonard Susskind y otros, demasiados para nombrarlos a todos, han demostrado que algo conocido como una *cero-brana* —posiblemente el ingrediente más fundamental de la Teoría-M, un objeto que se comporta en cierto modo como una partícula puntual en las distancias largas, pero que tiene unas propiedades radicalmente diferentes en las distancias cortas— puede darnos una visión de un dominio sin espacio y sin tiempo. Los trabajos de estos investigadores han puesto de manifiesto que, mientras las cuerdas nos indican que los conceptos convencionales de espacio dejan de tener importancia a escalas inferiores a la longitud de Planck, las cero-branas dan esencialmente la misma conclusión pero también proveen una diminuta ventana sobre el nuevo marco no convencional que toma el control. Estudios con estas cero-branas indican que la geometría ordinaria queda sustituida por algo conocido como geometría *no conmutativa*, un área de las matemáticas desarrollada en gran parte por el matemático francés Alain Connes.[140] En este marco geométrico, las nociones convencionales de espacio y distancia entre puntos se funden y desaparecen, dejándonos un paisaje conceptual muy diferente. No obstante, centrando la atención

en escalas mayores que la longitud de Planck, los físicos han demostrado que nuestra noción convencional de espacio vuelve a emerger. Es probable que el marco de la geometría no conmutativa esté todavía a algunos pasos de distancia del estado de pizarra en blanco que mencionábamos anteriormente, pero dicho marco nos da un indicio de lo que puede involucrar ese marco más completo al que se incorporarían el espacio y el tiempo.

Una de las cuestiones más importantes con las que se enfrentan los especialistas en teoría de cuerdas es hallar el aparato matemático correcto para formular dicha teoría sin recurrir a un concepto preexistente de espacio y tiempo. Si llegáramos a comprender cómo surgen el espacio y el tiempo, esto sería dar un gran paso hacia delante y acercarnos a una situación en la que podríamos responder la pregunta crucial sobre qué forma geométrica *emerge* realmente.

¿Llevará la teoría de cuerdas a una reformulación de la mecánica cuántica?

El universo está gobernado por los principios de la mecánica cuántica con una precisión fantástica. A pesar de esto, al formular sus teorías durante el último medio siglo, los físicos han seguido una estrategia que, hablando estructuralmente, sitúa la mecánica cuántica en una posición más bien secundaria. Cuando desarrollan sus teorías, los físicos comienzan a menudo a trabajar en un lenguaje puramente clásico que ignora las probabilidades cuánticas, las funciones de onda, etc. —un lenguaje que sería perfectamente inteligible para los físicos en la época de Maxwell e inclusive en la de Newton— y luego, sucesivamente, van superponiendo los conceptos cuánticos sobre el andamiaje clásico. Este planteamiento no es particularmente sorprendente, ya que refleja directamente nuestras experiencias. A primera vista, el universo parece estar gobernado por unas leyes arraigadas en conceptos clásicos tales como una partícula que posee una posición y una velocidad definidas en el tiempo, en cualquier momento dado. Sólo después de un detallado examen microscópico nos damos cuenta de que debemos modificar esas ideas clásicas que nos resultan familiares. Nuestro proceso de descubrimiento se ha desarrollado yendo desde un marco clásico hasta un marco que está modificado por las innovaciones cuánticas, y esta progresión tiene su eco en el modo en que los físicos han procedido siempre, hasta la fecha, para construir sus teorías.

Este es ciertamente el caso con la teoría de cuerdas. El formalismo matemático que describe la teoría de cuerdas comienza con ecuaciones que describen el

movimiento de un fragmento diminuto e infinitamente delgado de cuerda *clásica*, unas ecuaciones que, en gran medida, podría haber escrito Newton hace alrededor de trescientos años. Después, estas ecuaciones se *cuantizan*, es decir, utilizando un método sistemático desarrollado por los físicos durante más de cincuenta años, las ecuaciones clásicas se convierten en un marco mecánico-cuántico en el que las probabilidades, la incertidumbre, los temblores cuánticos, etc., se incorporan directamente. De hecho, en el capítulo 12 hemos visto este procedimiento en acción: los procesos de bucles (véase la Figura 12.6) utilizan conceptos cuánticos —en este caso, la repentina creación mecánico-cuántica de pares de cuerdas virtuales— en los que el número de bucles determina la precisión con la cual se justifican los efectos mecánico-cuánticos.

La estrategia de comenzar con una descripción teórica que es clásica y luego incluir progresivamente las características de la mecánica cuántica ha sido tremendamente fructífera durante muchos años. En ella se basa, por ejemplo; el modelo estándar de la física de partículas. Pero es posible, y también hay cada vez más pruebas de que es probable, que este método resulte demasiado conservador para tratar teorías de tan largo alcance como la teoría de cuerdas y la Teoría-M. La razón es que una vez que constatamos que el universo está gobernado por principios mecánico-cuánticos, nuestras teorías deberían ser desde un principio mecánico-cuánticas. De partida hemos tenido éxito comenzando desde una perspectiva clásica, porque no hemos estado sondeando el universo a un nivel lo suficientemente profundo como para que este burdo planteamiento nos desviara del objetivo. Sin embargo, con la profundidad de la teoría de cuerdas/Teoría-M, es muy posible que hayamos llegado al final de la línea en esta estrategia comprobada en la batalla.

Podemos encontrar pruebas específicas de esto reconsiderando algunas de las ideas que surgen de la segunda revolución de las supercuerdas (como se resume, por ejemplo, en la Figura 12.11). Como ya explicamos en el capítulo 12, las dualidades que subyacen a la unidad de las cinco teorías de cuerdas nos demuestran que los procesos físicos que tienen lugar en cualquiera de las formulaciones de la teoría se pueden reinterpretar en el lenguaje dual de cualquiera de las otras. Al principio, parecerá que esta reformulación tiene poco que ver con la descripción original, pero, de hecho, esto es simplemente el poder de la dualidad funcionando: mediante la dualidad, un proceso físico se puede describir en una cantidad de modos ampliamente diferentes. Estos resultados son al mismo tiempo sutiles y notables, pero aún no hemos mencionado lo que podría ser probablemente su característica más importante.

Las traducciones de la dualidad a menudo siguen un proceso, descrito en una de las cinco teorías de cuerdas, que tiene una *fuerte* dependencia de la mecánica cuántica (por ejemplo, un proceso que involucra interacciones entre cuerdas que no se producirían si el universo estuviera gobernado por la física clásica, en oposición a la

física cuántica) y la reformulan como un proceso que tiene una *débil* dependencia de la mecánica cuántica desde la perspectiva de alguna de las otras teorías de cuerdas (por ejemplo, un proceso cuyas detalladas propiedades numéricas están influenciadas por consideraciones cuánticas, pero cuya forma cualitativa es similar a la que tendría en un universo puramente clásico). Esto significa que la mecánica cuántica está completamente entrelazada dentro de las simetrías de dualidad que subyacen a la teoría de cuerdas/Teoría-M: se trata de *simetrías inherentemente mecánico-cuánticas*, ya que una de las descripciones duales está fuertemente influenciada por las consideraciones cuánticas. Esto indica inequívocamente que la formulación completa de la teoría de cuerdas/Teoría-M —una formulación que fundamentalmente incorpora las recién halladas simetrías de dualidad— no puede empezar de una manera clásica y luego experimentar una cuantización, dentro del molde tradicional. Un punto de partida clásico omitirá necesariamente las simetrías de dualidad, ya que éstas sólo se mantienen verdaderas cuando se tiene en cuenta la mecánica cuántica. Parece, más bien, que la formulación completa de la teoría de cuerdas/Teoría-M debe romper el molde tradicional y surgir como una auténtica teoría mecánico-cuántica.

Actualmente, nadie sabe cómo hacer esto. Pero muchos especialistas en teoría de cuerdas prevén, como la próxima revolución importante, una reformulación del modo en que los principios cuánticos se incorporan a nuestra descripción teórica del universo. Por ejemplo, como ha dicho Cumrun Vafa: «Pienso que una reformulación de la mecánica cuántica que resolverá muchos de sus rompecabezas está detrás de la esquina. Creo que muchos comparten la opinión de que las dualidades recientemente descubiertas apuntan hacia un nuevo marco, más geométrico, para la mecánica cuántica, en el que el espacio, el tiempo y las propiedades cuánticas estarán inseparablemente unidas».[141] Y, según Edward Witten: «Creo que el estatus lógico de la mecánica cuántica va a cambiar de una manera similar a la manera en que cambió el estatus lógico de la gravedad cuando Einstein descubrió el principio de equivalencia. Este proceso está muy lejos de quedar completo con la mecánica cuántica, pero pienso que la humanidad mirará algún día hacia atrás considerando nuestra época como el período en que empezó dicho proceso».[142]

Con un optimismo prudente, podemos prever que una remodelación del marco de los principios de la mecánica cuántica dentro de la teoría de cuerdas puede producir un formalismo más poderoso que sea capaz de aportar la respuesta a la pregunta de cómo empezó el universo y por qué existen cosas tales como el espacio y el tiempo. Un formalismo que nos llevará un paso más cerca para responder a la pregunta que formuló Leibniz sobre por qué hay algo en vez de nada.

¿Puede ser testeada experimentalmente la teoría de cuerdas?

Entre las muchas características de la teoría de cuerdas que hemos discutido en los capítulos anteriores, las tres siguientes son quizá las más importantes para tenerlas muy presentes en la memoria. En primer lugar, la gravedad y la mecánica cuántica son parte integrante del funcionamiento del universo y, por consiguiente, cualquier supuesta teoría unificada debe incluir a ambas. La teoría de cuerdas cumple este requisito. En segundo lugar, hay estudios realizados por físicos a lo largo del siglo pasado que ponen de manifiesto la existencia de otras ideas clave —muchas de las cuales se han confirmado experimentalmente que parecen muy importantes para nuestra comprensión del universo. Entre éstas figuran el concepto de espín, la estructura de familia de las partículas de materia, las partículas mensajeras, la simetría gauge, el principio de equivalencia, la ruptura de la simetría y la supersimetría, por nombrar unas pocas. Todos estos conceptos emergen de forma natural a partir de la teoría de cuerdas. En tercer lugar, a diferencia de otras teorías más convencionales, tales como el modelo estándar, en el que hay 19 parámetros libres que se pueden ajustar para garantizar que concuerden con las mediciones experimentales, la teoría de cuerdas no tiene parámetros ajustables. En principio, sus implicaciones deberían ser completamente definitivas: deberían proporcionar una comprobación sin ambigüedades mediante la cual se pueda saber si la teoría es correcta o errónea.

El camino que va desde este razonamiento «en principio» hasta el hecho «en la práctica» está plagado de obstáculos. En el capítulo 9 mencionábamos algunos de los obstáculos técnicos, tales como la determinación de la forma de las dimensiones adicionales, que actualmente nos están cerrando el paso. En los capítulos 12 y 13 situábamos estos y otros obstáculos en el contexto más amplio de la necesidad de una comprensión exacta de la teoría de cuerdas, lo cual, como ya hemos visto, nos conduce de forma natural a tomar en consideración la Teoría-M. Sin duda, el logro de una comprensión total de la teoría de cuerdas/Teoría-M requerirá un largo y duro trabajo, así como una dosis igual de ingenuidad.

A cada paso que daban por el camino emprendido, los especialistas en teoría de cuerdas han buscado y continuarán buscando consecuencias de la teoría que se puedan observar experimentalmente. No debemos perder de vista las posibilidades remotas de hallar pruebas que confirmen la teoría de cuerdas, tal como se explicó en el capítulo 9. Además, a medida que profundicemos en nuestros conocimientos, habrá sin duda otros raros procesos o características de la teoría de cuerdas que sugerirán otros procedimientos experimentales indirectos.

Pero, lo que aún es más notable, la confirmación de la supersimetría, a través del descubrimiento de las partículas superparejas tal como se comentó en el capítulo 9,

sería un hito importante para la teoría de cuerdas. Recordemos que la supersimetría se descubrió en el curso de unas investigaciones teóricas en el marco de la teoría de cuerdas, y que es una parte fundamental de esta teoría. Su confirmación experimental constituiría una prueba irrefutable, aunque circunstancial, para las cuerdas. Además, el hallazgo de las partículas superparejas podría proporcionar un bienvenido desafío, ya que el descubrimiento de la supersimetría haría mucho más que responder a la pregunta del «sí o no» sobre su relevancia con respecto a nuestro universo. Las masas y las cargas de las partículas superparejas podrían revelar el modo detallado en el cual la supersimetría se incorpora a las leyes de la naturaleza. Los especialistas en teoría de cuerdas se enfrentarían entonces al desafío de ver si su implementación puede constatarse o explicarse plenamente mediante la teoría de cuerdas. Desde luego, podemos ser aún más optimistas y esperar que durante la próxima década —antes de que sea puesto a punto el Gran Acelerador de Hadrones de Ginebra— los conocimientos sobre la teoría de cuerdas progresarán lo suficiente para que se puedan hacer predicciones detalladas sobre las superparejas antes de su esperado descubrimiento. La confirmación de estas predicciones sería un hito monumental en la historia de la ciencia.

¿Hay límites para la explicación?

Explicarlo todo, incluso en el sentido circunscrito de comprender todos los aspectos de las fuerzas y de los constituyentes elementales del universo, es uno de los mayores desafíos que la ciencia ha afrontado hasta ahora. Además, por primera vez, la teoría de las supercuerdas nos ofrece un marco que parece tener suficiente profundidad para asumir el desafío. Pero ¿llegaremos alguna vez a disponer en realidad de todo lo que promete la teoría y, por ejemplo, a calcular las masas de los quarks o la intensidad de la fuerza electromagnética, unos números cuyos valores exactos nos dirían tantas cosas sobre el universo? Como en las secciones anteriores, tendremos que superar numerosos obstáculos teóricos en el camino hacia estos objetivos —actualmente, el más importante es conseguir una formulación completa no perturbativa de la teoría de cuerdas/Teoría-M.

Pero ¿es posible que, incluso si tuviéramos un conocimiento exacto de la teoría de cuerdas/Teoría-M, enmarcado en una nueva y más transparente formulación de la mecánica cuántica, pudiéramos fracasar en nuestro intento de calcular las masas de las partículas y la intensidad de las fuerzas? ¿Es posible que todavía tuviéramos que recurrir a las mediciones experimentales, en vez de a los cálculos teóricos, para hallar

sus valores? Y, además, ¿podría ser que este fracaso no significara que necesitamos buscar una teoría aún más profunda, sino que sencillamente reflejara que *no hay* una explicación para estas propiedades observadas en la realidad?

Una respuesta inmediata a todas estas preguntas es sí. Como Einstein dijo hace algún tiempo: «Lo más incomprensible del universo es que es comprensible».[143] El asombro ante nuestra capacidad de comprender el universo en su conjunto desaparece en una época en que se realizan rápidos e impresionantes progresos. Sin embargo, puede que exista un límite para la facultad de comprender. Puede que tengamos que aceptar que, después de alcanzar el nivel más profundo posible de comprensión que la ciencia pueda ofrecer, habrá no obstante aspectos del universo que queden sin explicación. Puede que tengamos que aceptar que ciertas características del universo son del modo que son por casualidad, accidente o designio divino. El éxito obtenido por el método científico en el pasado nos ha animado a pensar que con esfuerzo y tiempo suficiente *podemos* develar los misterios de la naturaleza. Pero ir hasta el límite absoluto de la explicación científica —no hasta un obstáculo tecnológico o hasta el extremo actual, pero progresivo, del conocimiento humano— sería un acontecimiento singular para el que no podría preparamos toda la experiencia anterior.

Aunque sea de gran importancia para nuestra búsqueda de la teoría definitiva, éste es un tema que todavía no podemos resolver; en efecto, la posibilidad de que existan límites para la explicación científica, en el sentido amplio en que la hemos planteado, es una cuestión que puede que no se resuelva nunca. Hemos visto, por ejemplo, que incluso el concepto especulativo del multiverso, que a primera vista parece presentar un límite definitivo para la explicación científica, se puede tratar imaginando teorías igualmente especulativas que, al menos en principio, pueden devolvernos un cierto poder predictivo.

Una característica notable que surge de estas consideraciones es el papel de la cosmología a la hora de determinar las implicaciones de una teoría definitiva. Como ya hemos discutido, la cosmología de las supercuerdas es un campo joven, incluso con respecto a los jovencísimos estándares establecidos por la propia teoría de cuerdas. Indudablemente, durante los años venideros será un área de investigación primaria y es probable que sea una de las áreas de mayor crecimiento de todo el campo. A medida que sigamos obteniendo nuevos conocimientos sobre las propiedades de la teoría de cuerdas/Teoría-M, crecerá nuestra capacidad de valorar las implicaciones cosmológicas de este interesante intento de lograr una teoría unificada. Por supuesto, es posible que tales estudios puedan un día llegar a convencernos de que, en efecto, existe un límite para la explicación científica. Sin embargo, también es posible por el contrario que esos estudios puedan anunciar una nueva era, una era en la que podamos declarar que se ha hallado finalmente una

explicación fundamental del universo.

Alcanzando las estrellas

Aunque desde un punto de vista tecnológico estamos ligados a la Tierra y a sus vecinos más próximos del sistema solar, mediante el poder del pensamiento y la experimentación hemos sondeado a largo alcance la extensión del espacio, tanto interior como exterior. En particular durante los últimos cien años, el esfuerzo colectivo de numerosos físicos ha revelado algunos de los secretos mejor guardados de la naturaleza. Además, una vez revelados, estas joyas explicativas han abierto la visión hacia un mundo que creíamos conocer, pero cuyo esplendor ni siquiera habíamos llegado a imaginar. Un indicador de lo profunda que es una teoría física sería la medida en que esta teoría plantea serios desafíos a ciertos aspectos de nuestra visión del universo que anteriormente nos parecían inmutables. Utilizando este indicador, la mecánica cuántica y las teorías de la relatividad tienen una profundidad que va más allá de las expectativas más ambiciosas que haya podido tener cualquiera: las funciones de onda, las probabilidades, el efecto de túnel cuántico, las fluctuaciones energéticas incesantes del vacío, la dependencia mutua del espacio y el tiempo, el carácter relativo de la simultaneidad, el alabeo de la estructura del espacio-tiempo, los agujeros negros, el *big bang* ¿Quién se hubiera imaginado que la perspectiva newtoniana intuitiva, mecánica y determinista se convertiría en algo tan completamente pueblerino, que existía todo un mundo nuevo y sorprendente justo debajo de la apariencia de las cosas como se las percibe corrientemente?

Pero, incluso estos descubrimientos que hacen que los paradigmas se sacudan, son sólo una parte de una historia más amplia que lo abarca todo. Con una fe sólida en que las leyes de lo grande y de lo pequeño encajan unas con otras en un todo coherente, los físicos persiguen incesantemente la escurridiza teoría unificada. La búsqueda no ha terminado, pero mediante la teoría de las supercuerdas y su evolución para dar lugar a la Teoría-M, ha surgido finalmente un convincente marco en el que se fusionan la mecánica cuántica, la relatividad general, las fuerzas nucleares fuerte y débil y la fuerza electromagnética, y son monumentales los desafíos que estos avances plantean al modo de ver el mundo que teníamos anteriormente: bucles de cuerdas y glóbulos oscilantes, uniendo toda la creación en patrones vibratorios que se ejecutan meticulosamente en un universo en el que hay numerosas dimensiones escondidas capaces de experimentar contorsiones extremas en las que su estructura espacial se rasga y luego se repara por sí misma. ¿Quién podría haber adivinado que

la fusión de la gravedad y de la mecánica cuántica en una teoría unificada de toda la materia y todas las fuerzas produciría una revolución así en nuestra manera de entender cómo funciona el universo?

No hay duda de que hay sorpresas aún mayores que nos están esperando mientras continuamos buscando una comprensión plena, tratable mediante cálculos de la teoría de supercuerdas. A través de los estudios realizados sobre la Teoría-M, hemos vislumbrado ya un dominio nuevo y extraño del universo que está oculto más allá de la longitud de Planck, posiblemente uno en el que no existe noción del tiempo o del espacio. En el extremo opuesto, hemos visto también que nuestro universo puede ser meramente una de las innumerables burbujas espumantes en la superficie de un océano cósmico vasto y turbulento, llamado multiverso. Estas ideas son por el momento motivo de especulación, pero puede que presagien el próximo salto en nuestra compresión del universo.

Cuando dirigimos la vista al futuro e intuimos todas las maravillas que puede almacenar todavía para nosotros, deberíamos también mirar hacia atrás y maravillarnos ante ese viaje que nos ha traído tan lejos. La búsqueda de las leyes fundamentales del universo es un drama específicamente humano, que ha hecho que la mente se ensanche y ha enriquecido el espíritu. La viva descripción que hizo Einstein de sus propias indagaciones para comprender la gravedad —«dos años de búsqueda ansiosa en la oscuridad, con intenso anhelo, alternando momentos de confianza y de agotamiento, y la salida por fin a la luz»[144]— puede seguramente abarcar todos los esfuerzos humanos. Todos somos, cada uno a su manera, buscadores de la verdad y cada uno de nosotros puede ansiar una respuesta a la cuestión que plantea por qué estamos aquí. En nuestra escalada colectiva de la montaña del conocimiento, cada generación se apoya firmemente en los hombros de la anterior, buscando valerosamente la cima. No podemos predecir que alguno de nuestros descendientes vaya algún día a disfrutar del panorama que se ve desde la cumbre y pueda contemplar el vasto y elegante universo con una perspectiva de claridad infinita. Sin embargo, en la medida en que cada generación asciende en su escalada un poco más arriba, comprendemos la afirmación de Jacob Bronowski: «En toda época hay un momento decisivo de cambio, un nuevo modo de buscar y aseverar la coherencia del universo».[145] Y, viendo que nuestra generación se maravilla ante nuestra nueva visión del universo —nuestro nuevo modo de aseverar la coherencia del universo— sabemos que estamos cumpliendo con nuestro deber, aportando nuestro peldaño a la escalera humana para alcanzar las estrellas.

Glosario de términos científicos

celeración. Cambio en la velocidad o la dirección de un objeto. Véase también *velocidad*.

lerador. Véase *acelerador de partículas*.

lerador de partículas. Aparato para dar impulso a las partículas acelerándolas hasta una velocidad cercana a la de la luz y haciéndolas chocar entre sí violentamente con el fin de comprobar la estructura de la materia.

ıjero Multidimensional. Generalización del agujero que se encuentra en una «rosquilla» en versiones de dimensión superior.

ıjero negro. Objeto cuyo inmenso *campo* gravitatorio atrapa cualquier cosa, incluso la luz, que se le acerque demasiado (a una distancia menor que el *horizonte de sucesos* del agujero negro).

ıjero negro sin masa. En la teoría de cuerdas, un tipo especial de *agujero negro* que puede tener inicialmente una gran masa, pero que se vuelve cada vez más ligero a medida que una porción de *Calabi-Yau* del espacio se contrae. Cuando esa porción de espacio se ha contraído hasta convertirse en un punto, el agujero negro ha perdido la masa que inicialmente tenía y ya no tiene nada de masa. En este estado, no manifiesta las propiedades habituales del agujero negro, como es el poseer un *horizonte de sucesos*.

ıjeros negros extremados. *Agujeros negros* dotados de la cantidad máxima de *carga de fuerza* que es posible para una masa total determinada.

plitud. La altura máxima del pico o cresta de una onda, o la profundidad máxima del seno de una onda.

imateria. Materia que tiene las mismas propiedades gravitatorias que la materia ordinaria, pero con una carga eléctrica opuesta, así como *cargas de fuerza* nuclear opuestas.

:ipartícula. Partícula de la *antimateria*.

B. Acrónimo de «after the bang» («después de la explosión»); habitualmente utilizado en referencia al tiempo transcurrido desde el *big bang*.

mo. Bloque fundamental constituyente de la materia, que consiste en un *núcleo* (que contiene *protones* y *neutrones*) y un enjambre de *electrones* que describen órbitas en torno a dicho núcleo.

ibrana. Véase *brana*.

bang (Gran explosión). Teoría aceptada actualmente según la cual el universo en expansión comenzó a existir hace unos 15 mil millones de años a partir de un estado en el que la energía, la densidad y la compresión eran enormes.

crunch (Gran crujido). Un futuro hipotético para el universo en el que se detiene la expansión actual, se invierte, y tiene como resultado que todo el espacio y toda la materia se reúnen para colapsarse; es el proceso inverso del *big bang*.

ón. Una partícula, o un patrón de vibración de *cuerdas*, cuyo *espín* es un número entero; es un ejemplo típico de *partícula mensajera*.

ón gauge débil. Paquete mínimo del *campo de fuerza nuclear débil*; *partícula mensajera* de la *fuerza nuclear débil*; llamado bosón W o bosón Z.

ón W o Z. Véase *bosón gauge débil*.

ına. Cualquiera de los objetos extendidos que aparecen en la *teoría de cuerdas* Una unibrana es una *cuerda*, una bibrana es una membrana, una tribrana tiene tres dimensiones extendidas, etc. En general, una p-brana tiene *p* dimensiones espaciales.

ampo, Campo de fuerza. Desde una perspectiva *macroscópica*, el medio a través del cual una fuerza transmite su influencia; un campo se define mediante un conjunto de números en cada punto del espacio que reflejan la intensidad y la dirección de la fuerza en ese punto.

npo electromagnético. Campo de fuerza de la *fuerza electromagnética*, consistente en líneas de fuerza eléctricas y magnéticas en todos los puntos del espacio.

:ga. Véase *carga de fuerza*.

:ga de fuerza. Propiedad de una partícula que determina cómo responde dicha

partícula a la acción de una fuerza concreta. Por ejemplo, la carga eléctrica de una partícula determina cómo responde ésta ante la *fuerza electromagnética*.

o Absoluto. La temperatura más baja posible: aproximadamente –273 grados Celsius o 0 en la escala Kelvin.

ral, Chiralidad. Característica de la física de las partículas fundamentales que distingue la derecha de la izquierda, demostrando que el universo no tiene una simetría izquierda-derecha completa.

ustrofobia cuántica. Véase *fluctuaciones cuánticas*.

ndiciones iniciales. Datos que describen el estado inicial de un sistema físico.

nstante cosmológica. Una modificación de las ecuaciones originales de la *relatividad general*, que justifica la existencia de un universo estático; se puede interpretar como una densidad de energía constante del vacío.

nstante de acoplamiento. Véase *constante de acoplamiento de cuerdas*.

nstante de acoplamiento de cuerdas. Un número (positivo) que determina cómo es la probabilidad de que una *cuerda* dada se escinda en dos cuerdas o de que dos cuerdas se unan formando una sola —los procesos básicos de la *teoría de cuerdas* —.Cada teoría de cuerdas tiene su propia constante de acoplamiento de cuerdas, cuyo valor debe ser determinado mediante una fórmula; por ahora estas fórmulas no se comprenden lo suficiente como para obtener de ellas información útil. Las constantes de acoplamiento que sean menores que 1 implican que son válidos los *métodos perturbativos*.

nstante de Planck. Se expresa mediante el símbolo ħ. La constante de Planck es un parámetro fundamental de la *mecánica cuántica* Determina el tamaño de las unidades discretas de energía, masa, *espín*, etc., mediante las cuales se realiza la partición del mundo microscópico. Su valor es 1.05×10^{-27} gramos-centímetros^2/segundo.

ntracción de Lorentz. Fenómeno que surge a partir de la *relatividad especial*, en el que un objeto en movimiento se acorta a lo largo de la dirección de dicho movimiento.

omodinámica cuántica (Quantum chromodynamics: QCD). *Teoría relativista cuántica de campos* de la *fuerza nuclear fuerte* y de los *quarks* en la que interviene la *relatividad especial*.

antos. Unidades físicas mínimas en las que se puede dividir cualquier cosa, según las leyes de la mecánica cuántica. Por ejemplo, los fotones son los cuantos del campo electromagnético.

erda. Objeto unidimensional básico que es el ingrediente esencial de la *teoría de*

cuerdas.

erda abierta. Tipo de *cuerda* con dos extremos libres.

erda cerrada. Un tipo de *cuerda* que forma un bucle.

rvatura. Desviación de un objeto, del espacio, o del *espacio-tiempo*, con respecto a una forma *plana* y, por lo tanto, con respecto a las reglas de la geometría codificada por Euclides.

ébilmente acoplado. Teoría cuya *constante de acoplamiento de cuerdas* es menor que 1.

erminismo cuántico. Propiedad de la *mecánica cuántica* según la cual el conocimiento del estado cuántico de un sistema en un momento dado determinaría completamente su estado cuántico en momentos pasados y futuros. El conocimiento del estado cuántico, sin embargo, determina sólo la probabilidad de que se dé realmente en el futuro un estado u otro.

erminismo Laplaciano. Concepción del universo como un mecanismo de relojería en el que el conocimiento completo del estado del universo en un momento dado determina totalmente su estado en cualquier momento futuro o pasado.

atación del tiempo. Fenómeno que surge de la *relatividad especial*, donde el flujo del tiempo se vuelve más lento para un *observador* que esté en movimiento.

nensión. Eje o dirección independiente en el espacio o en el *espacio-tiempo* El espacio intuitivamente perceptible que nos rodea tiene tres dimensiones (izquierda-derecha, adelante-atrás, arriba-abajo) y el espacio-tiempo que intuimos tiene cuatro (los tres ejes anteriores más el eje pasado-futuro).La *teoría de supercuerdas* exige que el universo tenga dimensiones espaciales adicionales.

nensión arrollada. Una *dimensión* espacial que no tiene una extensión espacial grande observable; una dimensión espacial que está arrugada, enrollada o arrollada, dando así un tamaño muy pequeño, con lo cual escapa a una detección directa.

nensión extendida. *Dimensión* espacial (y del *espacio-tiempo*) que es grande y directamente perceptible; una dimensión con la que estamos normalmente familiarizados, al contrario de lo que sucede con una *dimensión arrollada*.

al, Dualidad, Simetrías de dualidad. Situación en la que dos o más teorías parecen ser completamente diferentes, pero en realidad dan lugar a consecuencias físicas idénticas.

alidad fuerte-débil. Situación en la que una teoría *fuertemente acoplada* es *dual* —idéntica físicamente— de una teoría diferente *débilmente acoplada*.

alidad onda-partícula. Característica básica de la *mecánica cuántica*, según la cual los objetos poseen propiedades tanto de ondas, como de partículas.

cuación de Klein-Gordon. Ecuación fundamental de la *teoría relativista cuántica de campos*.

uación de Schrödinger. Ecuación que rige la evolución de las ondas de probabilidad en la mecánica cuántica.

cto de túnel cuántico. Fenómeno que se da en la mecánica cuántica según el cual los objetos pueden atravesar barreras que deberían ser impenetrables según las leyes clásicas de la física de Newton.

cto fotoeléctrico. Fenómeno en el que los *electrones* son expelidos de una superficie metálica cuando la luz incide sobre ella.

ctrodinámica cuántica (Quantum electrodynamics: QED). Teoría *relativista de campos cuánticos* de la fuerza electromagnética y de los *electrones* en la que interviene la *relatividad especial*.

ctrón. Partícula con carga negativa; lo típico es encontrarla describiendo órbitas alrededor del núcleo de un *átomo*.

ergía de bobinado. Energía que contiene una *cuerda* enrollada alrededor de una *dimensión* circular del espacio.

ergía de Planck. Alrededor de 1.000 horas de kilovatio. La energía necesaria para comprobar distancias tan pequeñas como la *longitud de Planck* La energía que suele tener una *cuerda* que vibra en la *teoría de cuerdas*.

ropía. Medida del desorden en un sistema físico; el número de reordenaciones de los elementos constituyentes de un sistema que deja intacta la apariencia global de dicho sistema.

ropía del agujero negro. *Entropía* contenida dentro de un *agujero negro*.

era. La superficie que rodea una pelota. La superficie de una familiar pelota tridimensional tiene dos dimensiones (las cuales pueden ser etiquetadas por dos números tales como «latitud» y «longitud», como en la superficie de la Tierra).El concepto de esfera, no obstante, se aplica más generalmente a pelotas y por ende a sus superficies, en cualquier número de dimensiones. Una esfera unidimensional es

un nombre elegante para un círculo; una esfera cerodimensional son dos puntos (como se explica en el texto).Una esfera tridimensional es difícil de describir; es la superficie de una pelota de cuatro dimensiones.

era bidimensional. Véase *esfera*.

era cerodimensional. Véase *esfera*.

era tridimensional. Véase *esfera*.

acio o forma de Calabi-Yau. Un espacio (una forma) donde las dimensiones espaciales adicionales que requiere la *teoría de cuerdas* se pueden *arrollar*, en coherencia con las ecuaciones de la teoría.

acio-tiempo. Unión del espacio y el tiempo que surge inicialmente de la *relatividad especial*.Se puede considerar como el «tejido» con el cual está confeccionado el universo; constituye el escenario dinámico dentro del cual tienen lugar los sucesos.

ín. Versión mecánico-cuántica de la noción más conocida de ímpetu angular; las partículas tienen una cantidad intrínseca de espín, que es un número entero o la mitad de un número entero impar (en múltiplos de la *constante de Planck*), y que nunca cambia.

uma. Véase *espuma del espacio-tiempo*.

uma cuántica. Véase *espuma del espacio-tiempo*.

uma del espacio-tiempo. Aspecto espumoso, retorcido y tumultuoso de la estructura del *espacio-tiempo* a escalas *ultramicroscópicas*, de acuerdo con la perspectiva convencional de las partículas puntuales. Una razón esencial anterior a la teoría de cuerdas para la incompatibilidad de la *mecánica cuántica* y la *relatividad general* anterior a la *teoría de cuerdas*.

ados BPS. Configuraciones dentro de una teoría *supersimétrica* cuyas propiedades se pueden determinar de manera exacta mediante argumentos basados en la *simetría*.

milias. Clasificación de las partículas de la materia en tres grupos, de tal manera que cada uno de estos grupos se denomina familia. Las partículas de cada familia sucesiva difieren de las de la anterior en que son más pesadas, pero llevan las mismas *cargas de fuerza* eléctricas y nucleares.

e. Cuando se utiliza en referencia a la materia, este término alude a sus estados posibles: fase sólida, fase líquida, fase gaseosa. De una manera más general, se refiere a las posibles descripciones de un sistema físico a medida que varían las

características de las cuales depende ese sistema (temperatura, valores de la *constante de acoplamiento de cuerdas*, forma del *espacio-tiempo*, etc).

mión. Partícula, o patrón de vibración de *cuerda*, con un *espín* igual a la mitad de un número entero impar; es el caso típico de partícula de materia.

ctuación cuántica. Comportamiento turbulento de un sistema a escalas microscópicas debido al *principio de incertidumbre*.

ón. Paquete mínimo del *campo de fuerza electromagnética*; partícula mensajera de la *fuerza electromagnética*; paquete mínimo de luz.

cuencia. El número de los ciclos de onda completos que realiza una onda cada segundo.

rtemente acoplada. Se dice de la teoría cuya *constante de acoplamiento de cuerdas* es mayor que 1.

rza débil, Fuerza nuclear débil. Una de las cuatro fuerzas fundamentales, conocida sobre todo por mediar en la desintegración radioactiva.

rza electromagnética. Una de las cuatro fuerzas fundamentales: es una unión de las fuerzas eléctricas y magnéticas.

rza fuerte, fuerza nuclear fuerte. La más fuerte o intensa de las cuatro fuerzas fundamentales. Es la responsable de mantener los *quarks* encerrados dentro de los *protones* y los *neutrones*, y de mantener a los protones y los neutrones apiñados en el interior de los núcleos de los átomos.

rza gravitatoria. La más débil de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Fue descrita por la teoría universal de la gravedad de Newton, y posteriormente por la *relatividad general* de Einstein.

ción de onda. Ondas de probabilidad en las que se basa la *mecánica cuántica*.

eometría cuántica. Modificación de la *geometría de Riemann* necesaria para describir con exactitud las propiedades físicas del espacio a escalas ultramicroscópicas, en las que los efectos cuánticos se vuelven importantes.

metría Riemanniana. Marco matemático para describir formas curvas de cualquier dimensión. Desempeña un papel central en la descripción de Einstein del *espacio-tiempo* en la *relatividad general*.

ón. Paquete mínimo del *campo de la fuerza nuclear fuerte; partícula mensajera* de la fuerza nuclear fuerte.

ın unificación. Conjunto de las teorías que fusionan las tres fuerzas no gravitatorias en un único marco teórico.

ıvedad cuántica. Teoría que fusiona con éxito la *mecánica cuántica* y la *relatividad general*, incluyendo posiblemente modificaciones de una de ellas o de ambas. La *teoría de cuerdas* es un ejemplo de teoría de la gravedad cuántica.

ıvitón. Paquete mínimo del *campo de fuerza gravitatoria; partícula mensajera* de la fuerza de gravedad.

orizonte de sucesos. Superficie de ida sin retorno de un *agujero negro*; una vez que se atraviesa, las leyes de la gravedad garantizan que no hay retorno, ya que no se puede escapar de la poderosa atracción gravitatoria del agujero negro.

lación, Cosmología inflacionaria. Modificación en el planteamiento de los primeros momentos de la cosmología estándar del *big bang* según la cual el universo experimenta un breve y repentino momento de enorme expansión.

nitudes. Típica respuesta absurda que aparece en aquellos cálculos en los que participan la *relatividad general* y la *mecánica cuántica* en un marco de partículas puntuales.

elvin. Escala de temperaturas en la que éstas se registran tomando como referencia el *cero absoluto*.

ímina universal. Superficie bidimensional que es barrida por una *cuerda* cuando ésta se mueve.

res del movimiento de Newton. Leyes que describen el movimiento de los cuerpos, basándose en la concepción de un espacio y un tiempo absolutos e inmutables; estas leyes mantuvieron su predominio hasta que Einstein descubrió la *relatividad especial*.

o, Espacio liso. Región del espacio en la cual la estructura del mismo es plana o está suavemente curvada, sin pinzamientos, ni rupturas, ni arrugas o pliegues de ninguna

clase.

ıgitud de onda. Distancia entre picos o senos sucesivos de una onda.

ıgitud de Planck. Alrededor de 10^{-33} centímetros. La escala por debajo de la cual las *fluctuaciones cuánticas* se harían enormes en la estructura del *espacio-tiempo* El tamaño de la típica *cuerda* según la *teoría de cuerdas*.

acroscópico. Se refiere a escalas que se encuentran habitualmente en la vida cotidiana, y otras aún mayores; en pocas palabras, es lo contrario de microscópico.

sa de Planck. Alrededor de diez trillones de veces la masa de un *protón*; aproximadamente una cienmilésima de gramo; más o menos la masa de una pequeña mota de polvo. Según la *teoría de cuerdas,* la típica masa equivalente de una *cuerda* que vibra.

cánica cuántica. Marco de leyes que gobiernan el universo y cuyos sorprendentes fenómenos, tales como la *incertidumbre*, las *fluctuaciones cuánticas*, y la *dualidad onda-partícula* se hacen más evidentes con las escalas microscópicas de los átomos y las partículas subnucleares.

delo estándar de la cosmología. Teoría del *big bang* junto con un modo de comprender las tres fuerzas no gravitatorias tal como se definen en el *modelo estándar de la física de partículas*.

delo estándar de la física de partículas, Modelo estándar, Teoría estándar. Una teoría que ha tenido enorme éxito, referente a las tres fuerzas no gravitatorias y su acción sobre la materia. De hecho, es la unión de la *cromodinámica cuántica* y de la *teoría electro débil*.

delo estándar supersimétrico. Generalización del *modelo estándar de la física de partículas* para incluir la *supersimetría* Este modelo trae consigo una duplicación de las clases de partículas elementales conocidas.

do de enrollamiento. Configuración de una *cuerda* que se enrolla alrededor de una *dimensión* circular del espacio.

do de una cuerda. Una configuración posible *(Patrón vibratorio, configuración de enrollamiento*) que puede adoptar una *cuerda*.

do vibratorio. Véase *patrón vibratorio*.

ltiverso. Ampliación hipotética del cosmos en la que nuestro universo no es sino uno más de un enorme número de universos separados y distintos.

eutrino. Partícula eléctricamente neutra, sometida solamente a la *fuerza nuclear débil*.

ıtrón. Partícula eléctricamente neutra, que se encuentra sobre todo en el núcleo de un *átomo* y está formada por tres *quarks* (dos quarks-abajo y un quark-arriba).

perturbativa. Característica de una teoría cuya validez no depende de cálculos aproximados en el marco de la teoría de las perturbaciones; característica de exactitud de una teoría.

:leo. Parte central de un *átomo*, formada por *protones* y *neutrones*.

nero de enrollamiento. Número de veces que una *cuerda* envuelve una dimensión circular del espacio enrollándose en torno a ella.

nero de vibración. Número entero que describe la energía en el movimiento *vibratoriamente uniforme* de una *cuerda*; la energía de su movimiento global como opuesto al asociado con cambios en su forma.

bservador. Persona idealizada o componente del instrumental, a menudo hipotética, que mide propiedades importantes de un sistema físico.

da electromagnética. Perturbación similar a una onda que se produce en un *campo electromagnético*; todas las ondas de este tipo se desplazan a la velocidad de la luz. Ejemplos de estas ondas son la luz visible, los rayos X, las microondas, y la radiación infrarroja.

ırtícula mensajera. Paquete mínimo de un *campo de fuerza*; es la transportadora *microscópica* de una fuerza.

'tículas virtuales. Partículas que surgen momentáneamente del vacío; existen gracias a una energía prestada, coherente con el *principio de incertidumbre*, y se extinguen rápidamente, devolviendo así la energía prestada.

rón de interferencia. Patrón de onda que se forma a partir de la superposición y la mezcla de ondas emitidas desde distintos lugares.

rón oscilatorio. Véase *patrón vibratorio*.

rón vibratorio. El número exacto de picos y senos, así como su amplitud, cuando una *cuerda* oscila.

no. Sometido a las reglas de la geometría euclideana; una forma, como la superficie perfectamente lisa del tablero superior de una mesa y sus generalizaciones en dimensiones superiores.

nteamiento perturbativo, Método perturbativo. Véase *teoría perturbativa*.

ncipio antrópico. Doctrina según la cual una explicación de por qué el universo tiene las propiedades que observamos es que, si esas propiedades fueran diferentes, es probable que la vida no se hubiera creado y, por consiguiente, no podríamos estar aquí para observar los cambios.

ncipio de equivalencia. Principio central de la *relatividad general* en el que se afirma que el movimiento acelerado y la inmersión en un campo gravitatorio son indistinguibles (en zonas de observación suficientemente pequeñas).Este principio es una generalización del *principio de relatividad*, ya que sostiene que todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento, pueden afirmar que se encuentran inmóviles, siempre y cuando reconozcan la presencia de un campo gravitatorio adecuado.

ncipio de incertidumbre. Principio de la *mecánica cuántica*, descubierto por Heisenberg, según el cual existen datos en el universo, como la *posición* y la *velocidad* de una partícula, que no se pueden conocer con total precisión. Tales aspectos inciertos del mundo microscópico se acentúan aún más cuando las escalas de distancia y de tiempo en las que se miden dichos aspectos se vuelven más pequeñas. Las partículas y los campos se ondulan y saltan entre todos los valores posibles coherentes con la incertidumbre cuántica. Esto implica que el dominio de lo microscópico es un exasperante frenesí que flota en un mar violento de *fluctuaciones cuánticas*.

ncipio de relatividad. Principio fundamental de la *relatividad especial* que afirma que todos los *observadores* que se desplazan a *velocidad* constante están sometidos al mismo conjunto de leyes físicas y, por consiguiente, todo observador que se desplace a velocidad constante puede declarar que se encuentra inmóvil. El *principio de equivalencia* es una generalización de este principio.

blema del horizonte. Rompecabezas cosmológico asociado con el hecho de que las regiones del universo que estén separadas por grandes distancias tienen propiedades casi idénticas, como, por ejemplo, la temperatura. La *cosmología inflacionaria* ofrece una solución.

ceso de bucle único. Contribución a un cálculo de la *teoría de perturbación* en el que

está implicado un par virtual de *cuerdas* (o partículas en el caso de una teoría sobre partículas puntuales).

ducto. El resultado de multiplicar dos números.

tón. Partícula cargada positivamente. Se encuentra principalmente en el núcleo de un átomo y está formado por tres *quarks* (dos quarks-arriba y un quark-abajo).

uark. Partícula sobre la que actúa la fuerza nuclear fuerte. Los quarks existen en seis variedades (up: arriba, down: abajo, charm: encanto, strange: extraño, top: cima, bottom: fondo) y en tres «colores» (rojo, verde, azul).

adiación. La energía transportada por ondas o partículas.

liación de fondo de microondas cósmica. Radiación de microondas que se difunde por el universo, producida durante el *big bang* y posteriormente reducida y enfriada a medida que el universo se expandía.

liación electromagnética. Energía transportada por una *onda electromagnética*.

íproco. El inverso de un número; por ejemplo, el recíproco de 3 es $^{1}/_{3}$, el recíproco de es 2.

atividad especial. Leyes de Einstein relativas al espacio y al tiempo en ausencia de la gravedad (véase también *relatividad general*).

atividad general. Formulación de la gravedad realizada por Einstein, según la cual el espacio y el tiempo transmiten la fuerza de la gravedad a través de su *curvatura*.

oj de luz. Reloj hipotético que mide el tiempo transcurrido, contando el número de viajes de ida y vuelta que realiza un único *fotón* entre dos espejos.

onancia. Uno de los estados naturales de oscilación de un sistema físico.

quilla múltiple, rosquilla multiasa. Generalización de la forma de una rosquilla (un toro) que tiene más de un agujero.

tura de la simetría. Una reducción en la cantidad de *simetría* que parece tener un sistema, habitualmente asociada con una *transición de fase*.

gunda ley de la termodinámica. Ley que afirma que la *entropía* total siempre aumenta.

unda revolución de las supercuerdas. Período en el desarrollo de la *teoría de cuerdas* que comenzó hacia 1995, en el que empezaron a comprenderse algunos aspectos *noperturbativos*.

ıetría. Propiedad de un sistema físico que no cambia cuando el sistema sufre algún tipo de transformación. Por ejemplo, una *esfera* es simétrica con respecto a la rotación, ya que su aspecto no cambia cuando se le hace rotar.

ıetría de la fuerza nuclear fuerte. *Simetría gauge* que subyace a la *fuerza nuclear fuerte*, asociada con la invariancia de un sistema físico cuando se producen cambios en las cargas de color de los *quarks*.

ıetría especular. En el Contexto de la *teoría de cuerdas*, una *simetría* que muestra que dos *formas de Calabi-Yau* diferentes, que se denominan par de espejos, dan lugar a propiedades físicas idénticas cuando se eligen para las *dimensiones arrolladas* de la *teoría de cuerdas*.

ıetría gauge. Principio de *simetría* que subyace a la descripción mecánico-cuántica de las tres fuerzas no gravitatorias; esta simetría incluye la invariancia de un sistema físico al ser sometido a diversas modificaciones en los valores de las *cargas de fuerza*, modificaciones que pueden cambiar de un lugar a otro y de un momento a otro.

ıetría gauge débil. *Simetría gauge* que subyace a la *fuerza nuclear débil*.

ıetría gauge electromagnética. *Simetría gauge* en la que se basa la *electrodinámica cuántica*.

gularidad. Lugar donde la estructura del espacio o del *espacio-tiempo* sufre una ruptura devastadora.

tesis nuclear primordial Producción de núcleos atómicos que tuvo lugar durante los primeros tres minutos después del *big bang*.

ıción de Schwarzschild. Solución de las ecuaciones de la *relatividad general* para una distribución esférica de la materia; una de las implicaciones de esta solución es la posible existencia de *agujeros negros*.

ıerficie esférica. Véase *esfera*.

ıergravedad. Conjunto de teorías de partículas puntuales que combinan la *relatividad*

general y la *supersimetría*.

›ergravedad en once dimensiones. Prometedora teoría de la *supergravedad ultradimensional* desarrollada en la década de 1970, posteriormente ignorada, y que ha demostrado recientemente ser una parte importante de la *teoría de cuerdas*.

›ergravedad ultradimensional. Clase de teorías de la *supergravedad* en más de cuatro dimensiones del *espacio-tiempo*.

›erparejas. Partículas cuyos valores de *espín* difieren en media unidad y que están emparejadas mediante la *supersimetría*.

›ersimetría. Principio de *simetría* que relaciona las propiedades de las partículas con un número entero como valor del *espín* (bosones) con las propiedades de las partículas cuyo *espín* es la mitad de un número entero impar (fermiones).

ıquión. Partícula cuya masa (elevada al cuadrado) es negativa; su presencia en una teoría conduce a inconsistencias.

ısión de Planck. Alrededor de 10^{39} toneladas. La tensión de una típica *cuerda* dentro de la *teoría de cuerdas*.

ría cuántica electrodébil. Véase *teoría electrodébil*.

ría de campos cuánticos. Véase *teoría de campos cuánticos relativista*.

ría de campos cuánticos relativista. Teoría mecánico-cuántica de campos, tales como el *campo electromagnético*, que incluye la *relatividad especial*.

ría de campos cuánticos supersimétrica. *Teoría de campos cuánticos* que incluye la *supersimetría*.

ría de cuerdas. *Teoría unificada* del universo en la que se afirma que los constituyentes fundamentales de la naturaleza no son partículas puntuales de dimensión cero, sino diminutos filamentos unidimensionales llamados *cuerdas*.La teoría de cuerdas une armoniosamente la *mecánica cuántica* y la *relatividad general*, las leyes que se conocían anteriormente, para lo pequeño la una, y para lo grande la otra, que de otra manera son incompatibles. A menudo se utiliza esta expresión para referirse abreviadamente a la *teoría de supercuerdas*.

ría de cuerdas bosónica. Primera teoría de cuerdas que llegó a conocerse; contiene *patrones vibratorios* que son todos *bosones*.

ría de cuerdas del Tipo I. Una de las cinco *teorías de supercuerdas*; incluye tanto cuerdas *abiertas* como *cerradas*.

ría de cuerdas del Tipo IIA. Una de las cinco *teorías de supercuerdas*; incluye *cuerdas cerradas* con *patrones vibratorios* que tienen simetría izquierda-derecha.

ría de cuerdas del Tipo IIB. Una de las cinco *teorías de supercuerdas*; incluye *cuerdas cerradas* con *patrones vibratorios* que son asimétricos con respecto a la izquierda-derecha.

ría de cuerdas Heterótica-E (Heterótica $E_8 \times E_8$). Una de las cinco *teorías de supercuerdas*; en ella participan las cuerdas cerradas, cuyas vibraciones con movimiento hacia la derecha se parecen a las de la *cuerda Tipo II* y cuyas vibraciones hacia la izquierda incluyen las de las *cuerdas bosónicas*.Tiene diferencias importantes, pero sutiles, con la *teoría de cuerdas Heterótica-O*.

ría de cuerdas Heterótica-O (Heterótica O(32)). Una de las cinco *teorías de supercuerdas*; en ella participan las cuerdas cerradas, cuyas vibraciones con movimiento hacia la derecha se parecen a las de la *cuerda Tipo II* y cuyas vibraciones hacia la izquierda incluyen las de las *cuerdas bosónicas*.Tiene diferencias importantes, pero sutiles, con la *teoría de cuerdas Heterótica-E*.

ría de Kaluza-Klein. Conjunto de teorías que incorporan *dimensiones arrolladas* adicionales, junto con la *mecánica cuántica*.

ría de Maxwell, teoría electromagnética de Maxwell. Teoría que une la electricidad y el magnetismo, basada en el concepto de *campo electromagnético*, y desarrollada por Maxwell en la década de 1880; esta teoría muestra que la luz visible es un ejemplo de *onda electromagnética*.

ría de perturbación. Marco en el que se puede simplificar un problema difícil hallando una solución aproximada que posteriormente es ajustada a medida que se tienen en cuenta sistemáticamente otros detalles que inicialmente se ignoraban.

ría de supercuerdas. *Teoría de cuerdas* que incluye la *supersimetría*.

ría de todo (Theory of Everything: T.O.E).. Una teoría mecánico-cuántica que engloba todas las fuerzas y toda la materia.

ría electrodébil. *Teoría de campos cuánticos relativista* que describe a la *fuerza nuclear débil* y a la *fuerza electromagnética* en un marco unificado.

ría-M. Teoría que surgió durante la *segunda revolución de las supercuerdas* y que une las cinco *teorías de supercuerdas* anteriores dentro de un único marco que las abarca a todas. La Teoría-M parece ser una teoría que utiliza once *dimensiones del espacio-tiempo*, aunque muchas de sus propiedades detalladas no se comprenden aún.

ría unificada, Teoría del campo unificado. Cualquier teoría que describe todas las cuatro fuerzas y toda la materia dentro de un marco único que lo abarca todo.

ría universal de la gravedad de Newton. Teoría de la gravedad que afirma que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos. Posteriormente reemplazada por la *relatividad general* de Einstein.

modinámica. Leyes desarrolladas en el siglo diecinueve para describir aspectos del calor, el trabajo, la energía, la *entropía*, y su evolución mutua en un sistema físico.

mpo de Planck. Alrededor de 10^{-43} segundos. Período de tiempo tras el cual el tamaño del universo era aproximadamente la *longitud de Planck*; con más precisión, es el tiempo que tarda la luz en recorrer la *longitud de Planck*.

ología. Clasificación de las formas en grupos que se pueden deformar para convertir uno en otro sin rasgar ni romper su estructura en modo alguno.

ológicamente distintas. Dos formas que no se pueden deformar para convertir la una en la otra sin romper de alguna manera su estructura.

o. La superficie bidimensional de una rosquilla.

nsición blanda. Evolución de la porción de *Calabi-Yau* del espacio en la que su estructura se rasga y se repara por sí misma, pero con unas consecuencias suaves y aceptables en el contexto de la teoría de cuerdas.

nsición blanda con rasgado del espacio. Véase *Transición blanda*.

nsición con cambio de topología. Evolución de la estructura del espacio que implica rasgados o rupturas, cambiando así la *topología* del espacio.

nsición de fase. Evolución de un sistema físico de una *fase* a otra.

nsición de plegamiento cónico. Evolución de la porción de *Calabi-Yau* del espacio en la que su estructura se rasga y se repara por sí misma, pero con unas consecuencias suaves y aceptables en el contexto de la *teoría de cuerdas*.Estos rasgados son más pronunciados que los de la *transición blanda*.

yectorias sumadas. Véase *Trayectorias sumadas de Feynman*.

yectorias sumadas de Feynman. Formulación de la *mecánica cuántica* según la cual se supone que las partículas se desplazan de un punto a otro recorriendo todas las trayectorias posibles entre ambos puntos.

-brana. Véase *brana*.

ltramicroscópico. Relativo a escalas de longitud menores que la *longitud de Planck*

(y también a escalas de tiempo menores que el *tiempo de Planck*).

elocidad. La dirección y el valor numérico que indica la rapidez del movimiento de un cuerpo.

ración uniforme. Movimiento global de una *cuerda* en el que ésta se mueve sin que se produzca ningún cambio en su forma.

/ **ormhole.** Agujero de gusano. Una región del espacio con forma de tubo que conecta una región del universo con otra.

Bibliografía selecta

ot, Edwin A. *Flatland: A Romance of Many Dimensions*. Princeton: Princeton University Press, 1991.

row, John D. *Theories of Everything*. New York: Fawcett-Columbine, 1992.

nowski, Jacob. *The Ascent of Man*. Boston: Little, Brown, 1973.

rk, Ronald W. *Einstein, The Life and Times*. New York: Avon, 1984.

ase, Robert P. and Mann, Charles C. *The Second Creation*. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996.

vies, P. C. W. *Superforce*. New York: Simon & Schuster, 1984.

vies, P. C. W., and J. Brown, eds. *Superstrings: A Theory of Everything?* Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1988.

tsch, David. *The Fabric of Reality*. New York: Allen Lane, 199 7.

stein, Albert. *The Meaning of Relativity*. Princeton: Princeton University Press, 1988.

Relativity. New York: Crown, 1961.

ris, Timothy *Coming of Age in the Milky Way* New York: Anchor, 1989.

The Whole Shebang. New York: Simon & Schuster, 1997.

sing, Albrecht. *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997.

nman, Richard. *The Character of Physical Law*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995.

now, George. *Mr. Tompkins in Paperback*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993.

l-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar*. New York: Freeman, 1994.

show, Sheldon. *Interactions*. New York: Time-Warner Books, 1988.

h, Alan H. *The Inflationary Universe*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.

vking, Stephen. *A Brief History of Time*. New York: Bantam Books, 1988.

vking, Stephen, and Roger Penrose. *The Nature of Space and Time*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

, Tony, and Patrick Walters. *Einstein's Mirror*. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997.

ku, Michio. *Beyond Einstein*. New York: Anchor, 1987.

Hyperspace. New York: Oxford University Press, 1994.

erman, Leon, with Dick Teresi. *The God Particle*. Boston: Houghton Mifflin, 1993.

dley, David. *The End of Physics*. New York: Basic Books, 1993.

Where Does the Weirdness Go? New York: Basic Books, 1996.

erbye, Dennis. *Lonely Hearts of the Cosmos*. New York: HarperCollins, 1991.

s, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. New York: Oxford University Press, 1982.

rose, Roger. *The Emperor's New Mind*. Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1989.

s, Martin J. *Before the Beginning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.

olin, Lee. *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press, 1997.

orne, Kip. *Black Holes and Time Warps*. New York: Norton, 1994.

nberg, Steven. *The First Three Minutes*. New York: Basic Books, 1993.

Dreams of a Final Theory. New York: Pantheon, 1992.

eeler, John A. *A Journey into Gravity and Spacetime*. New York: Scientific American Library, 1990.



BRIAN GREENE (9 de febrero de 1963, Nueva York) es un físico estadounidense y uno de los mayores defensores de la teoría de cuerdas.

Brian Greene es profesor en la Universidad de Columbia desde el año 1996. Greene fue un prodigio de las matemáticas. A la temprana edad de 5 años ya era capaz de multiplicar cifras de 30 dígitos. Su nivel en matemáticas era tan alto, que a los 12 años recibió clases de un profesor de la Universidad Columbia, ya que había sobrepasado con creces el nivel de matemáticas del instituto. Sin embargo, en su trabajo posterior ha explicado las dificultades que como físico ha tenido para comprender los trabajos matemáticos de Victor Batyrev que desarrolló un planteamiento matemático convencional y riguroso de aspectos previamente descubiertos por Greene. Así mismo, Greene explica que en el curso de su investigación sobre las transiciones blandas junto con David Morrison, un matemático de la Duke University, necesitó horas diarias de instrucción por parte de Morrison para comprender algunos de los aspectos matemáticos más complicados. Greene señala que a ese respecto existe una muy diferente cultura de trabajo en los métodos de físicos y matemáticos, que pueden hacer sus trabajos mutuamente incomprensibles en alto grado.

En 1980, Brian Greene entró en Harvard para estudiar física, y tras licenciarse, fue a la universidad de Oxford en Inglaterra, como Becario Rhodes.

Greene es el autor del conocido libro *El universo elegante* en el cual habla del desarrollo de la física del siglo XX repasando desde la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica hasta llegar a introducir los últimos desarrollos sobre la teoría de

las cuerdas, que constituye el núcleo del libro.

Notas

[1] La tabla que aparece a continuación es una elaboración de la Tabla 1.1. Refleja las masas y las cargas de fuerza de las partículas de las tres familias. Cada tipo de quark puede tener tres posibles cargas de fuerza nuclear fuerte que se denominan, algo extravagantemente, mediante colores que representan los valores numéricos de dichas cargas de la fuerza nuclear fuerte. Las cargas débiles que se reflejan son, concretando más, la «tercera componente» del isospín débil. (No hemos incluido en la lista las componentes «de mano derecha» de las partículas —ellos difieren en que no tienen carga débil).

Familia 1				
Partícula	Masa	Carga eléctrica	Carga débil	Carga fuerte
Electrón	.0054	–1	–1/2	0
Electrón-Neutrino	$<10^{-8}$	0	1/2	0
Up Quark	.0047	2/3	1/2	rojo, verde, azul
Down Quark	.0074	–1/3	–1/2	rojo, verde, azul
Familia 2				
Partícula	Masa	Carga eléctrica	Carga débil	Carga fuerte
Muon	.11	–1	–1/2	0
Muon-Neutrino	<.0003	0	1/2	0
Charm Quark	1.6	2/3	1/2	rojo, verde, azul
Strange Quark	.16	–1/3	–1/2	rojo, verde, azul
Familia 3				
Partícula	Masa	Carga eléctrica	Carga débil	Carga fuerte
Tau	1.9	–1	–1/2	0
Tau-Neutrino	<.033	0	1/2	0
Top Quark	189	2/3	1/2	rojo, verde, azul
Bottom Quark	5.2	–1/3	–1/2	rojo, verde, azul

<<

[2] Las cuerdas también pueden tener dos extremos que se mueven libremente (las llamadas *cuerdas abiertas*), además del caso de los bucles *(cuerdas cerradas*) que se representan en la Figura 1.1. Para hacer más fácil nuestra explicación, la mayoría de las veces nos centraremos en las cuerdas cerradas, aunque en esencia todo lo que digamos se puede aplicar a los dos tipos. <<

[3] Albert Einstein, en una carta dirigida a un amigo en 1942, según la cita del libro de Tony Hey y Patrick Walters, *Einstein's Mirror* (Cambridge University Press, Cambridge, 1977). <<

[4] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (Pantheon, Nueva York, 1992), p. 52. <<

[5] Entrevista con Edward Witten, 11 de mayo de 1998. <<

[6] La presencia de cuerpos de gran masa como la Tierra complica todo por la intervención de las fuerzas de la gravedad. Dado que ahora nos estamos centrando en el movimiento en dirección horizontal, no en dirección vertical, podemos ignorar e ignoraremos la presencia de la Tierra. En el próximo capítulo ofreceremos una explicación más detallada de la gravedad. <<

[7] Para el lector aficionado a las matemáticas, hemos de precisar que estas observaciones se pueden convertir en datos cuantitativos. Por ejemplo, si el reloj de luz, que está en movimiento, tiene una velocidad v y tarda t segundos en realizar un viaje completo de ida y vuelta (según la medición de nuestro reloj de luz, que está inmóvil), entonces este reloj habrá recorrido una distancia vt cuando su fotón ha vuelto al espejo inferior. Podemos ahora utilizar el teorema de Pitágoras para calcular que la longitud de cada uno de los recorridos diagonales de la Figura 2.3 es $\sqrt{[(vt/2)^2 + h^2]}$, donde h es la distancia entre los dos espejos de un reloj de luz (unos quince centímetros en el texto). Los dos recorridos diagonales juntos tienen por consiguiente una longitud $2\sqrt{[(vt/2)^2 + \mathrm{h}^2]}$. Dado que la velocidad de la luz tiene un valor constante, llamado convencionalmente c, la luz tarda $2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2/c}$ segundos en realizar completo el doble recorrido diagonal. Por lo tanto, tenemos la ecuación $t = 2V((vt/2)^2 + h^2)/c$, que se puede resolver despejando t, lo que daría $t = 2h/\sqrt{(c^2 - v^2)}$. Para evitar confusiones, escribamos esto como $t_{en\ movimiento} = 2h/(\sqrt{c^2 - v^2})$, donde el subíndice indica que se trata del tiempo que medimos para un tic del reloj que está en movimiento. Por otro lado, el tiempo para un tic del reloj que está inmóvil es $t_{inmóvil} = 2h/c$ y, como se pone de manifiesto aplicando un poco de álgebra, $t_{en\ movimiento} = t_{inmóvil} / \sqrt{(1 - v^2/c^2)}$, lo cual demuestra directamente que un tic del reloj en movimiento tarda más en producirse que un tic del reloj inmóvil. Esto significa que entre dos sucesos dados, en el reloj en movimiento se producirán en total menos tics que en el reloj inmóvil, lo cual demuestra que ha transcurrido menos tiempo para el observador que se está moviendo. <<

[8] En el caso de que le resulte a usted más convincente un experimento llevado a cabo en un contexto menos esotérico que un acelerador de partículas, vea lo siguiente. Durante octubre de 1971, J. C. Hafele, que entonces trabajaba en la Universidad de Washington en San Luis, y Richard Keating del *United States Naval Observatory* hicieron funcionar unos relojes atómicos que utilizaban un haz de luz de cesio en aviones comerciales durante 40 horas. Tras tener en cuenta ciertas características sutiles que tienen que ver con los efectos gravitatorios (lo cual se explicará en el próximo capítulo), la relatividad especial afirma que el tiempo total transcurrido en los relojes atómicos en movimiento debería ser unas pocas centésimas de milésima de millonésima de segundo menos que el tiempo transcurrido en los relojes inmóviles situados en tierra. Esto es precisamente lo que hallaron Hafele y Keating: el tiempo *se frena realmente* en un reloj en movimiento. <<

[9] Aunque la Figura 2.4 representa correctamente la contracción de un objeto que se encoge a lo largo de su dirección de movimiento, la imagen no ilustra lo que veríamos realmente si un objeto pasara como un rayo a casi la velocidad de la luz (suponiendo que nuestra vista o nuestro equipo fotográfico fueran capaces de ver algo). Para ver alguna cosa, nuestros ojos —o nuestra cámara— deben recibir la luz que se ha reflejado sobre la superficie del objeto. Pero, dado que la luz reflejada viaja hacia nosotros desde varios lugares del objeto, la luz que vemos en cualquier momento viaja hacia nosotros haciendo recorridos de longitudes diferentes. Esto da como resultado una especie de ilusión óptica relativista en la que el objeto aparecerá en escorzo y con una rotación. <<

[10] Para el lector aficionado a las matemáticas, hemos de precisar que desde la posición del espacio-tiempo dada por el vector de dimensión cuatro $x = (ct, x_1, x_2, x_3) = (ct, \vec{x})$ podemos obtener el vector de dimensión cuatro de la velocidad $u = dx/d\tau$, donde τ es el propio tiempo definido por $d\tau^2 = dt^2 - c^2(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2)$. Entonces la «velocidad a través del espacio-tiempo» es la magnitud del vector u cuadridimensional, $\sqrt{[(c^2 dt^2 - d\vec{x}^2) / (dt^2 - c^2 d\vec{x}^2)]}$, que es igual a la velocidad de la luz c. Ahora bien, podemos reordenar la ecuación $c^2(dt/d\tau)^2 - (d\vec{x}/d\tau)^2 = c^2$, para que sea $c^2(d\tau/dt)^2 + (d\vec{x}/dt)^2 = c^2$ Esto demuestra que un aumento en la velocidad de un objeto que atraviesa el espacio, $\sqrt{[(d\vec{x}/dt)^2]}$ debe estar acompañado por una disminución en dr/dt, siendo esto último la velocidad del objeto a través del tiempo (la velocidad a la cual el tiempo transcurre en su propio reloj, en comparación con la de nuestro reloj inmóvil, *dt*). <<

[11] Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*, transcription de A. Motte y Florian Cajori (University of California Press, Berkeley, 1962), vol. I, p. 634. <<

[12] Precisando un poco más, Einstein constató que el principio de equivalencia es aplicable siempre y cuando las observaciones estén confinadas en una región del espacio suficientemente pequeña —es decir, siempre que el «compartimento» sea suficientemente pequeño—. La razón es la siguiente: los campos gravitatorios pueden variar en intensidad (y en dirección) de un lugar a otro. Pero estamos suponiendo que la totalidad del compartimento se acelera como una sola unidad y por consiguiente esa aceleración simula un campo gravitatorio único y uniforme. Sin embargo, cuando el compartimento se va haciendo cada vez más pequeño, hay cada vez menos espacio suyo sobre el que pueda variar un campo gravitatorio y, por lo tanto, el principio de equivalencia se hace cada vez más aplicable. Técnicamente, la diferencia entre el campo gravitatorio uniforme simulado por un punto de observación acelerado y un campo gravitatorio «real» y posiblemente no uniforme creado por algún conjunto de cuerpos dotados de masa se conoce con el nombre de campo gravitatorio «mareal» (ya que explica el efecto gravitatorio de la Luna sobre las mareas que se producen en la Tierra). Por consiguiente, esta nota se puede resumir diciendo que los campos gravitatorios mareales se vuelven menos perceptibles a medida que el tamaño del compartimento disminuye, haciendo que el movimiento acelerado y un campo gravitatorio «real» sean indistinguibles. <<



[13] Albert Einstein, según se cita en *Albert Einstein*, de Albrecht Folsing (Viking, Nueva York, 1997), p. 315. <<



[14] John Stachel, «Einstein and the Rigidly Rotating Disk», en *General Relativity and Gravitation*, ed. A. Held (Plenum, Nueva York, 1980), p. 1. <<

[15] El análisis de la vuelta en el Tornado o del «disco de rotación rígida», como se denomina en un lenguaje más técnico, induce fácilmente a caer en una confusión. De hecho, hasta ahora no existe un acuerdo general sobre cierto número de aspectos sutiles de este ejemplo. En el texto hemos seguido el espíritu del propio análisis de Einstein, y en esta nota continuamos con este punto de vista e intentamos clarificar un par de características que han podido parecer confusas al lector. En primer lugar, puede que usted se pregunte por qué la circunferencia del Tornado no sufre la contracción de Lorentz exactamente de la misma manera que la regla, con lo que Slim habría medido la misma longitud que habíamos obtenido nosotros inicialmente. Pero, tenga en cuenta que a lo largo de nuestra explicación el Tornado siempre estaba girando: *nunca* lo hemos analizado cuando estaba inmóvil. Así pues, desde nuestra perspectiva de observadores inmóviles, la única diferencia entre la medición de la circunferencia hecha por Slim y la nuestra es que la regla de Slim sufre la contracción de Lorentz; el Tornado estaba girando cuando realizamos nuestra medición, y está girando cuando vemos que Slim realiza la suya. Como vemos que su regla está contraída, nos damos cuenta de que tendrá que colocarla más veces para recorrer toda la circunferencia, con lo que mide una longitud mayor que la que medimos nosotros. La contracción de Lorentz que experimenta la circunferencia del Tornado habría sido importante sólo si se comparaban las propiedades de esta atracción de feria cuando está girando con las propiedades que tiene cuando está parada, pero no necesitábamos esta comparación.

En segundo lugar, a pesar del hecho de que no necesitábamos analizar el Tornado cuando estaba parado, puede que el lector se pregunte qué *podría* suceder cuando va reduciendo la velocidad y se para. Ahora bien, parece que deberíamos tomar en consideración la cambiante circunferencia con una velocidad también cambiante debida a los distintos grados de la contracción de Lorentz. Pero ¿cómo se puede compaginar esto con el hecho de que el radio sea invariable? Se trata de un sutil problema cuya resolución depende del hecho de que en el mundo real no existen objetos totalmente *rígidos*. Los objetos se pueden estirar y combar y, de esa forma, acomodarse a los estiramientos y contracciones que hemos descubierto; si no es así, como Einstein indicó, un disco en rotación (que inicialmente se formó a partir de una pieza de metal fundido que giraba y se enfrió mientras estaba en movimiento) se rompería en pedazos si su velocidad de rotación sufriera cambios sucesivos. Para más detalles sobre la historia del disco de rotación rígida, véase Stachel, «Einstein and the Rigidly Rotating Disk». <<

[16] El lector experto reconocerá que en el ejemplo de las vueltas del Tornado, es decir, en el caso de un marco de referencia que gira uniformemente, las secciones espaciales tridimensionales curvas en las que hemos centrado la explicación encajan conjuntamente en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones cuya curvatura todavía se desvanece. <<

[17] Hermann Minkowski, como se cita en Folsing, *Albert Einstein*, p. 189. <<

[18] Entrevista con John Wheeler, 27 de enero de 1998. <<

[19] Aun así, los relojes atómicos existentes tienen la precisión suficiente para detectar esos pequeños alabeos del tiempo, y también otros aún más pequeños. Por ejemplo, en 1976 Robert Vessot y Martin Levine, del *Harvard-Smithsonian Astrophysical Observatory*, junto con colaboradores de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), lanzaron un cohete Scout D desde Wallops Island, en Virginia, que transportaba un reloj atómico cuya precisión era aproximadamente de hasta una billonésima de segundo por hora. Esperaban demostrar que cuando el cohete ganara altitud (disminuyendo así el efecto del tirón gravitatorio de la Tierra), un reloj atómico idéntico situado en la Tierra (sometido de lleno a la fuerza de la gravedad terrestre) marcaría el tiempo más lentamente. Mediante un flujo de señales de microondas que circulaban en sentido doble, los investigadores pudieron comparar la velocidad a la que marcaban el tiempo los dos relojes atómicos y, en efecto, a la máxima altitud del cohete, que fue de unos 9.650 kilómetros, su reloj atómico iba a una velocidad de aproximadamente 4 milmillonésimas más rápido que el reloj situado en la Tierra, lo cual coincidía con las predicciones teóricas, salvo un error de menos del 0,01 por 100. <<

[20] A mediados de la década de 1800, el científico francés Urbain Jean Joseph Le Verrier descubrió que el planeta Mercurio se desviaba ligeramente de la órbita alrededor del Sol predicha por la ley de la gravedad de Newton. Durante más de medio siglo, se dio toda una gama de explicaciones —la influencia gravitatoria de un planeta o anillo planetario aún sin descubrir, una luna desconocida, el efecto del polvo interplanetario, el achatamiento del Sol en sus polos— sobre lo que se llama precesión orbital por exceso del perihelio (en lenguaje llano, al final de cada órbita, Mercurio no da la vuelta exactamente donde la teoría de Newton dice que debería hacerlo), pero ninguna tuvo la fuerza suficiente como para conseguir una aceptación general. En 1915, Einstein calculó la precesión del perihelio de Mercurio utilizando sus recién descubiertas ecuaciones de la relatividad general y halló una respuesta que, según él mismo confesó, le dio palpitaciones cardíacas: el resultado obtenido a partir de la relatividad general coincidía exactamente con el de las observaciones. Ciertamente, este éxito fue un motivo importante para que Einstein tuviera tanta fe en su teoría, pero casi todos los demás científicos esperaban la confirmación de una predicción, en vez de la explicación de una anomalía previamente conocida. Para más detalles, véase Abraham Pais, *Subtle Is the Lord* (Oxford University Press, Nueva York, 1982), p. 253. <<

[21] Robert P. Crease y Charles C. Mann, *The Second Creation* (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996), p. 39. <<



[22] Sorprendentemente, investigaciones recientes sobre la velocidad concreta de la expansión cósmica sugieren que el universo puede, de hecho, tener una constante cosmológica muy pequeña pero no nula. <<

[23] Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1965), p. 129. <<

[24] Aunque el trabajo de Planck resolvía el enigma de la energía infinita, aparentemente no era este objetivo el que motivó directamente dicho trabajo. Lo que Planck estaba buscando era comprender un asunto estrechamente relacionado con dicho enigma: los resultados experimentales relativos a cómo se distribuye la energía en un horno caliente —un «cuerpo negro», para ser más precisos— según varios intervalos de longitudes de onda. Para más detalles sobre la historia de estos descubrimientos, el lector que esté interesado deberá consultar la obra de Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity*, 1894-1912 (Clarendon, Oxford, 1978). <<

[25] Para precisar un poco más, diremos que Planck demostró que las ondas cuyo contenido energético mínimo es mayor que su supuesta contribución energética *promedio* (según la termodinámica del siglo XIX) se suprimen exponencialmente. Esta supresión es cada vez más rápida cuando examinamos ondas de frecuencia cada vez mayor. <<

[26] La constante de Planck es 1.05×10^{-27} gramos-centímetros^{2}/segundo. <<

[27] Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor, 1989), p. 286. <<



[28] Stephen Hawking, ponencia en el *Amsterdam Symposium on Gravity*. Agujeros negros y teoría de cuerdas, 21 de junio de 1997. <<

[29] Es conveniente recalcar que el planteamiento de Feynman en relación con la mecánica cuántica se puede utilizar para deducir el planteamiento basado en las funciones de onda, y viceversa; por lo tanto, los dos planteamientos son totalmente equivalentes. Sin embargo, los conceptos, el lenguaje y la interpretación que cada planteamiento pone de relieve son bastante diferentes, aunque las respuestas que da cada uno son absolutamente idénticas. <<

[30] Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton: Princeton University Press, 1988). <<

[31] Stephen Hawking, *A Brief History of Time* (New York: Bantam Books, 1988), p. 175. <<



[32] Richard Feynman, como lo cita Timothy Ferris en *The Whole Shebang* (New York: Simon & Schuster, 1997), p. 97. <<

[33] En el caso de que todavía esté usted perplejo pensando cómo puede suceder alguna cosa dentro de una región del espacio que está vacía, es importante constatar que el principio de incertidumbre pone un límite a lo «vacía» que puede estar en realidad una región del espacio; este principio modifica lo que podamos entender por espacio vacío. Por ejemplo, cuando se aplica a las perturbaciones que pueden causar las ondas en un campo (como las ondas electromagnéticas que se desplazan por un campo electromagnético), el principio de incertidumbre muestra que la amplitud de una onda y la velocidad con la cual cambia su amplitud están sometidas a la misma relación inversa que la posición y la velocidad de una partícula: cuanto mayor sea la precisión con la que se especifique la amplitud, menos podemos saber sobre la velocidad con que cambia su amplitud. Entonces, cuando decimos que una región del espacio está vacía, lo que normalmente queremos decir es, entre otras cosas, que no hay ondas que pasen por esa región del espacio, y que todos los campos tienen valor cero. Con un lenguaje torpe, pero en definitiva útil, podemos reformular esto diciendo que las amplitudes de todas las ondas que atraviesan la región valen exactamente cero. Pero, si conocemos con exactitud las amplitudes, el principio de incertidumbre implica que la velocidad de cambio de las amplitudes es totalmente incierta y puede tomar en esencia cualquier valor. Sin embargo, si las amplitudes cambian, esto significa que en el momento siguiente *ya no valdrán cero*, aunque la región del espacio siga estando «vacía», En realidad, el campo será cero en *promedio*, ya que en algunos lugares será positivo, mientras en otros es negativo; en cuanto al promedio la energía neta de la región no ha cambiado. Pero esto es sólo como promedio. La incertidumbre cuántica implica que la energía del campo —incluso en una región vacía del espacio— fluctúa hacia arriba y hacia abajo, con un tamaño de las fluctuaciones que se hace cada vez mayor cuando las escalas de distancia y tiempo con las que se examina la región se hacen más pequeñas. La energía que contienen estas momentáneas fluctuaciones se puede convertir mediante la fórmula $E = mc^2$ en la creación repentina de pares de partículas y sus correspondientes antipartículas, que se aniquilan mutuamente con gran rapidez, para impedir que cambie la energía, por término medio. <<

[34] Aunque la ecuación inicial que escribió Schrödinger (la que incluía la relatividad especial) no describía exactamente las propiedades mecánico-cuánticas de los electrones que están en los átomos de hidrógeno, pronto se constató que era una ecuación válida cuando se utilizaba adecuadamente en otros contextos, y, de hecho, todavía está en uso actualmente. Sin embargo, en la época en que Schrödinger publicó esta ecuación, Oskar Klein y Walter Gordon ya se le habían adelantado, por lo que la ecuación relativista de Schrödinger recibe el nombre de «ecuación de Klein-Gordon». <<

[35] Para el lector aficionado a las matemáticas, queremos matizar que los principios de simetría utilizados en la física de partículas elementales se basan generalmente en los grupos, sobre todo en los grupos de Lie. Las partículas elementales están organizadas en representaciones de varios grupos y las ecuaciones que rigen su evolución en el tiempo han de respetar necesariamente las transformaciones simétricas asociadas. Para la fuerza nuclear fuerte, esta simetría se llama SU(3) (la análoga a las rotaciones tridimensionales ordinarias, pero actuando en un espacio complejo), y los tres colores de un tipo dado de quark se transforman en una representación tridimensional. El desplazamiento (del rojo, verde, azul al amarillo, índigo, violeta) mencionado en el texto es concretamente una transformación SU(3) que actúa en las «coordenadas de color» de un quark. Una simetría gauge es una simetría en la que las transformaciones del grupo pueden tener una dependencia del espacio-tiempo: en este caso, «rotando» los colores del quark de maneras diferentes en ubicaciones diferentes del espacio y en momentos diferentes en el tiempo. <<

[36] Durante el desarrollo de las teorías cuánticas de las tres fuerzas no gravitatorias, los físicos se encontraron también con cálculos que daban resultados infinitos. Sin embargo, con el tiempo gradualmente fueron dándose cuenta de que esos infinitos se podían suprimir mediante un instrumento llamado *renormalización*. Los infinitos que surgen al intentar fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica son casos mucho más graves y no se pueden someter a una cura de renormalización. Más recientemente, los físicos han constatado que las soluciones infinitas son señal de que una teoría se está utilizando para analizar un dominio que se encuentra más allá de los límites de su aplicabilidad. Dado que el objetivo de la investigación actual es hallar una teoría cuyo ámbito de aplicación sea, en principio, ilimitado —la teoría «definitiva» o «final»— los físicos desean hallar una teoría en la que no aparezcan soluciones infinitas, independientemente de lo extremado que pueda ser el sistema físico que se está analizando. <<

[37] El tamaño de la longitud de Planck se puede entender basándolo en un sencillo razonamiento que tiene sus raíces en lo que los físicos llaman análisis dimensional. La idea es la siguiente: cuando una teoría se formula como un conjunto de ecuaciones, los símbolos abstractos deben estar ligados a características físicas del universo, si la teoría ha de estar en contacto con la realidad. En particular, debemos presentar un sistema de unidades tal que si un símbolo, por ejemplo, se ha de referir a una longitud, tengamos una escala mediante la cual se pueda interpretar su valor. Después de todo, si las ecuaciones muestran que la longitud en cuestión es 5, necesitamos saber si eso significa 5 centímetros, 5 kilómetros o 5 años luz, etc. En una teoría que incluye la relatividad general y la mecánica cuántica, surge de forma natural una elección de unidades, de la siguiente manera. Hay dos constantes referidas a la naturaleza de las cuales depende la relatividad general: la velocidad de la luz, *c*, y la constante de la gravedad de Newton, *G*. La mecánica cuántica depende de una constante referida a la naturaleza: $\hbar$. Examinando las unidades de estas constantes (por ejemplo, c es una velocidad, por lo tanto se expresa como distancia dividida por el tiempo, etc). se puede ver que la expresión combinada $\sqrt{(\hbar G/c^3)}$ tiene las unidades de una longitud; de hecho es $1{,}616 \times 10^{-33}$ centímetros. Ésta es la longitud de Planck. Dado que incluye datos de la gravedad y del espacio-tiempo (*G* y *c*) y tiene asimismo una dependencia mecánico-cuántica ($\hbar$), establece la escala para las mediciones (la unidad natural de longitud) en cualquier teoría que pretenda fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica. Cuando en este texto utilizamos la expresión «longitud de Planck», lo que significa tiene a menudo un sentido aproximado, indicando una longitud que está dentro de unos pocos órdenes de magnitud de 10^{-33} centímetros. <<

[38] Actualmente, además de la teoría de cuerdas, hay otros dos métodos para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica que se están investigando activamente. Uno de ellos lo dirige Roger Penrose de la Universidad de Oxford y se conoce como *teoría del twistor*. El otro método, inspirado en parte por el trabajo de Penrose, lo dirige Abhay Ashtekar de la *Pennsylvania State University* y se conoce como el método de las *nuevas variables*. Aunque estos otros métodos no se van a explicar en este libro, existe una especulación creciente sobre la idea de que pueden tener una profunda conexión con la teoría de cuerdas y que, posiblemente, junto con la teoría de cuerdas, los tres planteamientos apuntan a la misma solución para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica. <<

[39] El lector experto se dará cuenta de que este capítulo se centra solamente en la teoría de cuerdas *perturbativa*; los aspectos no perturbativos se discuten en los capítulos 12 y 13. <<

[40] Entrevista con John Schwarz, 23 de diciembre de 1997. <<

[41] Tamiaki Yoneya, así como Korkut Bardakci y Martin Halpern, formularon sugerencias similares de forma independiente. El físico sueco Lars Brink contribuyó también significativamente al desarrollo de la teoría de cuerdas en sus primeros tiempos. <<

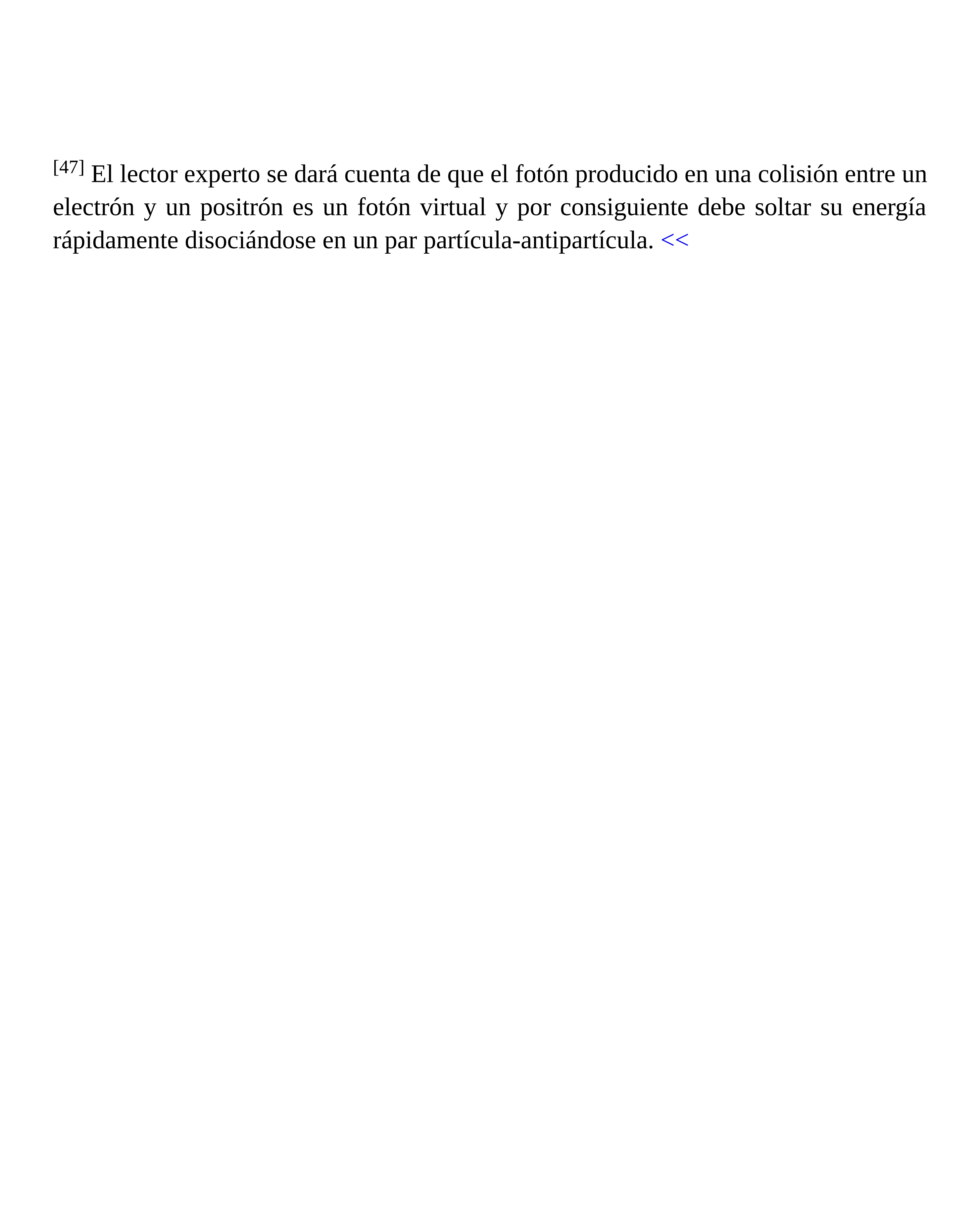
[42] Entrevista con John Schwarz, 23 de diciembre de 1997. <<

[43] Entrevista con Michael Green, 20 de diciembre de 1997. <<

[44] El modelo estándar sugiere un mecanismo por el cual las partículas adquieren masa —el mecanismo de Higgs, llamado según el físico escocés Peter Higgs—. Pero, desde la perspectiva de explicar las masas de las partículas, este modelo no hace más que desplazar el énfasis a la explicación de las propiedades de una hipotética «partícula donante de masa» —el llamado *bosón* de Higgs—. Las búsquedas experimentales de esta partícula están en marcha, pero una vez más, si se encuentran y se miden sus propiedades, estos valores serán datos que habrá que *introducir* en el modelo estándar, para el cual la teoría no ofrece explicación alguna. <<

[45] Para el lector aficionado a las matemáticas, ponemos de relieve que la asociación entre los patrones vibratorios de cuerdas y las cargas de fuerza se pueden describir con mayor exactitud del modo siguiente. Cuando se cuantiza el movimiento de una cuerda, sus posibles estados vibratorios se representan mediante vectores en un espacio de Hilbert, más o menos como en cualquier sistema mecánico-cuántico. Estos vectores se pueden etiquetar por sus valores propios según un conjunto de operadores hermíticos conmutativos. Entre estos operadores está el operador de Hamilton, cuyos valores propios dan la energía y, por lo tanto, la masa del estado de vibración, así como los operadores que generan varias simetrías gauge que la teoría respeta. Los valores propios de estos últimos operadores dan las cargas de fuerza transportadas por el estado vibratorio asociado de la cuerda. <<

[46] Basándose en ideas recogidas de la segunda revolución de las supercuerdas (comentada en el capítulo 12), Witten y, sobre todo, Joe Lykken del *Fermi National Accelerator Laboratory* han identificado en esta conclusión un sutil, pero posible, agujero de bucle. Lykken, aprovechando este descubrimiento, ha sugerido que podría ser que las cuerdas estuvieran posiblemente sometidas a mucha menos tensión, y fueran, en consecuencia, de un tamaño mucho mayor que el que inicialmente se les adjudicaba. De hecho, tan grandes que podrían ser observables para la próxima generación de aceleradores de partículas. Si esta remota posibilidad resulta verdadera, se plantea la emocionante perspectiva de que muchas de las importantes implicaciones de la teoría de cuerdas que se comentan en este y en los siguientes capítulos sean verificables experimentalmente durante la próxima década. Sin embargo, incluso en el marco más «convencional», adoptado por los especialistas en teoría de cuerdas, en el que las cuerdas son generalmente del orden de 10^{-33} centímetros de longitud, existen modos indirectos para buscarlas experimentalmente, como veremos en el capítulo 9. <<



[47] El lector experto se dará cuenta de que el fotón producido en una colisión entre un electrón y un positrón es un fotón virtual y por consiguiente debe soltar su energía rápidamente disociándose en un par partícula-antipartícula. <<

[48] Por supuesto, una cámara funciona captando fotones que rebotan sobre el objeto enfocado y reuniéndolos sobre un trozo de película fotográfica. Nuestra utilización de una cámara en este ejemplo es simbólica, ya que no nos imaginamos que los fotones reboten sobre las cuerdas con las que chocan. Lo que queremos es sencillamente recoger en la Figura 6.7 (c) toda la historia de la interacción. Dicho esto, debemos señalar otro aspecto sutil que la discusión en el texto ha dejado encubierto. Vimos en el capítulo 4 que podemos formular la mecánica cuántica utilizando el método de Feynman de sumar trayectorias, en el que analizamos el movimiento de los objetos combinando las contribuciones de *todas* las trayectorias posibles que van desde algún punto de partida que se ha seleccionado, hasta algún destino elegido (contribuyendo cada trayectoria con un peso estadístico determinado por Feynman). En las Figuras 6.6 y 6.7 mostramos *una* de las infinitas trayectorias posibles recorridas por partículas puntuales (Figura 6.6) o por cuerdas (Figura 6.7), llevándolas desde sus posiciones iniciales hasta sus destinos definitivos. La discusión que se lleva a cabo en esta sección, no obstante, es aplicable igualmente a cualquiera de las demás trayectorias posibles y, por lo tanto, es aplicable a todo el proceso mecánico-cuántico en sí mismo. (La formulación de Feynman relativa a la mecánica cuántica de las partículas puntuales en el marco de las trayectorias sumadas se generalizó a la teoría de cuerdas mediante los trabajos de Stanley Mandelstarn de la Universidad de California en Berkeley, y del físico ruso Alexander Polyakov, que trabaja ahora en el cuerpo docente del departamento de física de la Universidad de Princeton).<<

[49] Albert Einstein, como lo cita R. Clark en *Einstein: The Life and Times* (New York: Avon Books, 1984), p. 287. <<



[50] Más exactamente, espín–½ significa que el *momento angular* del electrón a partir de su espín es $h/2$. <<

[51] El descubrimiento y desarrollo de la supersimetría tienen una historia complicada. Además de las ya citadas en el texto, hubo contribuciones tempranas esenciales realizadas por R. Haag, M. Sohnius, J. T. Lopuszanski, Y. A. Golfand, E. P. Lichtman, J. L. Gervais, B. Sakita, V. P. Akulov, D. V. Volkov y V. A. Soroka, entre otros muchos. Algunos de sus trabajos están documentados en Rosanne Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry*, Institute for Theoretical Physics, State University of New York en Stony Brook, preimpresión ITP-SB-8878. <<

[52] Para el lector aficionado a las matemáticas diremos que esta extensión lleva consigo el aumento de las conocidas coordenadas cartesianas del espacio-tiempo mediante nuevas coordenadas cuánticas, por ejemplo u y v, que son anticonmutativas: $u \times v = -v \times u$. Se puede concebir entonces la supersimetría como traslaciones en este tipo de espacio-tiempo aumentado de una manera mecánico-cuántica. <<

[53] Para el lector que esté interesado en conocer más detalles sobre esta cuestión técnica, aclaramos lo siguiente. En la nota 6 del capítulo 6 decíamos que el modelo estándar alude a una «partícula donante de masa» (el bosón de Higgs) que dotaría de sus masas observadas a las partículas de las Tablas 1.1 y 1.2. Para que este procedimiento funcione, la partícula de Higgs no puede tener un peso demasiado grande; varios estudios muestran que su masa ciertamente no debe ser mayor que alrededor de 1.000 veces la masa de un protón. Pero resulta que las fluctuaciones cuánticas tienden a contribuir sustancialmente a la masa de la partícula de Higgs, haciendo que su masa se vaya acercando potencialmente a la escala de Planck. Los teóricos han descubierto, sin embargo, que este resultado, que revelaría un defecto importante en el modelo estándar, se puede evitar si ciertos parámetros del modelo estándar (sobre todo, la llamada masa simple de la partícula de Higgs) se ajustan con precisión de hasta 1 parte entre 10^{15} para contrarrestar los efectos de dichas fluctuaciones cuánticas sobre la masa de la partícula de Higgs. <<

[54] Un aspecto sutil que se puede mencionar en relación con la Figura 7.1 es que se ha demostrado que la intensidad de la fuerza nuclear débil está entre la de la fuerza nuclear fuerte y la de la fuerza electromagnética, mientras que anteriormente hemos dicho que es inferior a ambas. La razón de esto se puede ver en la Tabla 1.2 en la que se pone de manifiesto que las partículas mensajeras de la fuerza nuclear débil tienen una masa bastante grande, mientras que las de la fuerza nuclear fuerte y las de la fuerza electromagnética no tienen masa. Intrínsecamente, la intensidad de la fuerza nuclear débil —según la medición realizada mediante su constante de acoplamiento (un método que encontraremos en el capítulo 12)— es como se muestra en la Figura 7.1, pero sus partículas mensajeras, dotadas de masa, son perezosas a la hora de transportar su influencia y hacen que sus efectos disminuyan. En el capítulo 14 veremos cómo encaja la fuerza gravitatoria en la Figura 7.1. <<



[55] Edward Witten, conferencia en Heinz Pagels Memorial Lecture Series, Aspen, Colorado, 1997. <<



[56] Para una explicación a fondo de estos y otros conceptos relacionados, véase Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*. <<

[57] Es una idea sencilla, pero dado que la imprecisión del lenguaje corriente puede a veces inducir a confusión, conviene hacer dos observaciones aclaratorias. En primer lugar, estamos suponiendo que la hormiga se ve obligada a vivir sobre la *superficie* de la manguera de riego. Si, por el contrario, la hormiga pudiera excavar una madriguera en el *interior* de la manguera —si pudiera penetrar en el material de goma de la manguera— necesitaríamos tres números para precisar su posición, ya que también tendríamos que indicar la profundidad hasta la que ha excavado. Pero, si la hormiga vive únicamente en la superficie de la manguera, su ubicación se puede especificar con tan sólo dos números. Esto nos lleva al segundo punto. Incluso en el caso de que la hormiga viva en la superficie de la manguera, podríamos, si optamos por ello, especificar su ubicación mediante tres números: las posiciones habituales izquierda-derecha, adelante-atrás y arriba-abajo de nuestro espacio tridimensional habitual. Sin embargo, una vez que sabemos que la hormiga vive en la superficie de la manguera, los dos números mencionados en el texto nos dan los datos *mínimos* que determinan de manera unívoca la posición de la hormiga. Esto es lo que queremos decir cuando hablamos de que la superficie de la manguera es bidimensional. <<

[58] Sorprendentemente, los físicos Savas Dimopoulos, Nima Arkani-Hamed y Gia Dvali, trabajando sobre anteriores descubrimientos de Ignatios Antionadis y Joseph Lykken, han señalado que, aunque una dimensión adicional arrollada tuviera un tamaño de un milímetro, es posible que todavía no hubiera sido detectada experimentalmente. La razón es que los aceleradores de partículas comprueban el microcosmos utilizando las fuerzas nucleares débil y fuerte, y la fuerza electromagnética. La fuerza de la gravedad en general se ignora, ya que es increíblemente débil cuando se utilizan las energías tecnológicamente accesibles. Pero Dimopoulos y sus colaboradores observaron que si la dimensión adicional arrollada produce impacto predominantemente en la fuerza de la gravedad (algo que resulta bastante plausible en la teoría de cuerdas), podía ser que ninguno de los experimentos realizados hasta el momento la hubieran detectado. En un futuro cercano se realizarán nuevos experimentos altamente sensibles a la gravedad que buscarán esas dimensiones arrolladas «grandes». Un resultado positivo sería uno de los mayores descubrimientos de todos los tiempos. <<

[59] Edwin Abbott, *Flatland* (Princeton: Princeton University Press, 1991). <<

[60] Albert Einstein en una carta a T. Kaluza citada en Abraham Pais, *“Subtle is the Lord”: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 330. <<

[61] A. Einstein en una carta a T. Kaluza citada en D. Freedman y P. van Nieuwenhuizen, “The Hidden Dimensions of Spacetime”, *Scientific American* 252 (1985), 62. <<

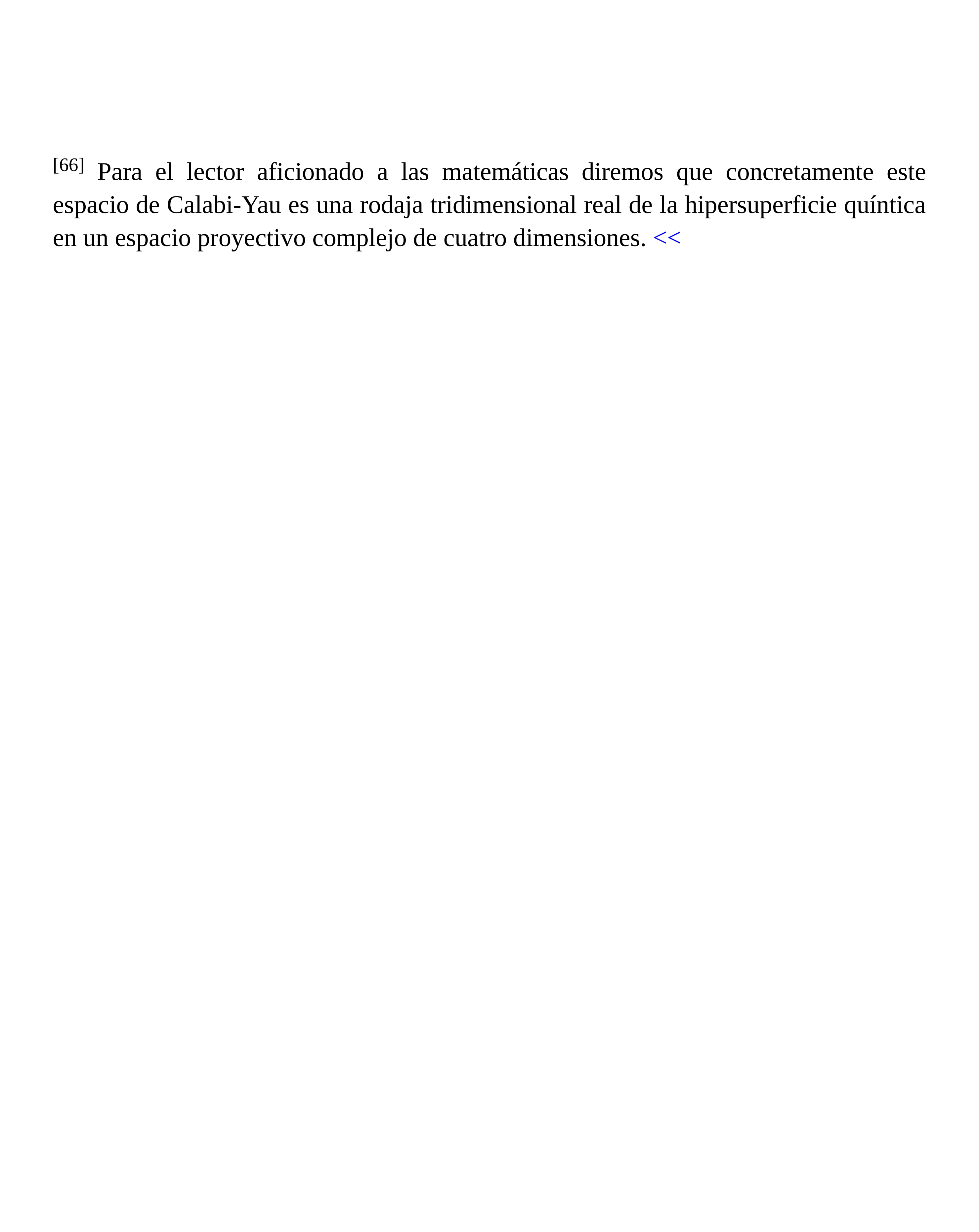
[62] Ibídem. <<

[63] Los físicos descubrieron que, dentro del modelo estándar, la característica que resultaba más difícil de expresar mediante una formulación definida en una dimensión superior era lo que se llama la *chirality*. Para no sobrecargar la discusión no hemos cubierto este concepto en el texto principal, pero lo haremos aquí brevemente para aquellos lectores que estén interesados. Supongamos que alguien nos muestra una filmación de algún experimento científico particular y nos plantea el desafío inusual de determinar si se filmó el experimento directamente o si se filmó su reflejo en un espejo. Como el operador era bastante experto, no hay indicios que revelen la utilización de un espejo. ¿Podríamos aceptar el desafío? A mediados de la década de 1950, los hallazgos teóricos de T. D. Lee y C. N. Yang, así como los resultados experimentales de C. S. Wu y sus colaboradores, demostraron que *se puede* aceptar el desafío, siempre y cuando se haya filmado el experimento adecuado. Concretamente, su trabajo establece que las leyes del universo no tienen una simetría de espejo perfecta, en el sentido de que la versión reflejada de ciertos procesos —aquellos que dependen directamente de la fuerza nuclear débil— *no pueden suceder en nuestro universo*, aunque el proceso original sí pueda suceder. Por consiguiente, cuando miramos la película, si vemos que tiene lugar uno de esos procesos prohibidos, sabemos que estamos viendo una imagen del experimento reflejada en el espejo, en vez del auténtico experimento. Dado que los espejos intercambian la izquierda y la derecha, la obra de Lee, Yang y Wu establece que el universo no tiene una simetría izquierda-derecha perfecta, es decir, en el lenguaje de los especialistas el universo es *chiral*. Ésta es la característica del modelo estándar (de la fuerza nuclear débil, en particular) que los físicos consideran casi imposible de incorporar a un marco de la supergravedad de dimensión superior. Para evitar confusiones, téngase en cuenta que en el capítulo 10 discutiremos un concepto de la teoría de cuerdas conocido como «simetría especular», pero el uso de la palabra «espejo» en ese contexto es completamente diferente del que tiene aquí. <<

[64] Para el lector aficionado a las matemáticas, diremos que una variedad de Calabi-Yau es una variedad compleja de Káhler con una clase principal de anulación de Chern. En 1957, Calabi formuló la conjetura según la cual toda variedad de este tipo admite una métrica de Ricci plana, y en 1977 Yau demostró que esto es cierto. <<



[65] Esta ilustración es cortesía de Andrew Hanson de la Universidad de Indiana y se realizó utilizando el paquete gráfico *Mathematica* 3-D. <<



[66] Para el lector aficionado a las matemáticas diremos que concretamente este espacio de Calabi-Yau es una rodaja tridimensional real de la hipersuperficie quíntica en un espacio proyectivo complejo de cuatro dimensiones. <<



[67] Edward Witten, “Reflections on the Fate of Spacetime” *Physics Today*, Abril de 1996, p. 24. <<

[68] Entrevista con Edward Witten, 11 de Mayo de 1998. <<



[69] Sheldon Glashow y Paul Ginsparg, “Desperately Seeking Superstrings?”, *Physics Today*, Mayo de 1986, p. 7. <<

[70] Sheldon Glashow, en *The Superworld I*, ed. A. Zichichi (New York: Plenum, 1990), p. 250. <<

[71] Sheldon Glashow, *Interactions* (New York: Warner Books, 1988), p. 335. <<

[72] Richard Feynman, en *Superstrings: A Theory of Everything?* ed. Paul Davies and Julian Brown (Cambridge, Eng: Cambridge University Press, 1988). <<



[73] Howard Georgi, in *The New Physics*, ed. Paul Davies (Cambridge: Cambridge University Press 1989), p. 446. <<

[74] Entrevista con Edward Witten, 4 de Marzo de 1998. <<

[75] Entrevista con Cumrun Vafa, 12 de Enero de 1998. <<

[76] Murray Gell-Mann, citado en Robert P. Crease y Charles C. Mann, *The Second Creation* (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press), 1996, p. 414. <<

[77] Entrevista con Sheldon Glashow, 28 de Diciembre de 1997. <<

[78] Entrevista con Sheldon Glashow, 28 de Diciembre de 1997. <<

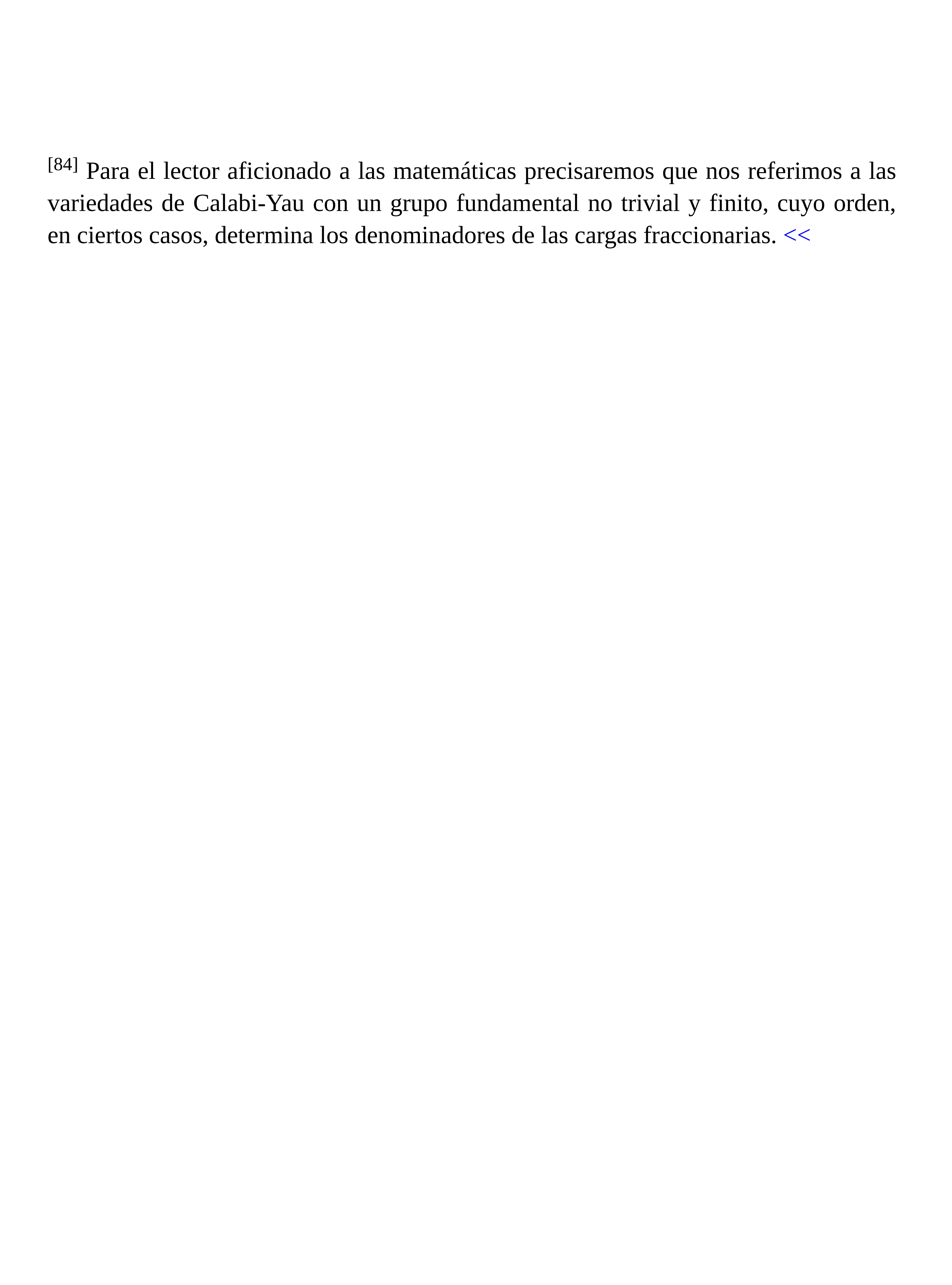
[79] Entrevista con Howard Georgi, 28 de Diciembre de 1997. Durante la entrevista, Georgi también indicó que la refutación experimental de la predicción del decaimiento del protón que surgía de su propuesta con Glashow de la primera gran teoría unificada (ver Capítulo 7) juega un rol importante en su reluctancia a abrazar la teoría de supercuerdas. Afirmaba en tono mordaz que su gran teoría unificada se refería a un dominio de energía considerablemente mayor que el de cualquier teoría anterior, y, cuando se demostró que su teoría estaba equivocada —cuando resultó, según sus propias palabras, que «la naturaleza lo había derribado de una bofetada»— su actitud con respecto al estudio de la física de energías extremadamente altas cambió de una manera drástica. Cuando le pregunté si la confirmación experimental de su gran teoría unificada hubiera podido inducirle a remitir la carga a la escala de Planck, me respondió: «Sí, probablemente lo hubiera hecho». <<

[80] David Gross, “Superstrings and Unification”, en *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics*, ed. R. Kotthaus y J. Kühn (Berlin: Springer-Verlag, 1988), p. 329. <<

[81] Dicho esto, vale la pena recordar la posibilidad remota, apuntada en la nota final 8 del capítulo 6, de que las cuerdas *podrían* ser significativamente más largas de lo que se pensó inicialmente y que, por consiguiente, dentro de unas pocas décadas podrían ser sometidas a una observación experimental directa mediante aceleradores de partículas. <<

[82] Para el lector aficionado a las matemáticas añadiremos que, dicho de un modo matemático más preciso, el número de familias es la mitad del valor absoluto del número de Euler del espacio de Calahi-Yau. El número de Euler es la suma alternante de las dimensiones de los grupos de homologías de las variedades, siendo estos grupos lo que vulgarmente denominamos agujeros multidimensionales. Así, hay tres familias que surgen de los espacios de Calabi-Yau cuyo número de Euler es ±6. <<

[83] Entrevista con John Schwarz, 23 de Diciembre de 1997. <<



[84] Para el lector aficionado a las matemáticas precisaremos que nos referimos a las variedades de Calabi-Yau con un grupo fundamental no trivial y finito, cuyo orden, en ciertos casos, determina los denominadores de las cargas fraccionarias. <<

[85] Entrevista con Edward Witten, 4 de marzo de 1998. <<

[86] Para el experto diremos que algunos de estos procesos infringen la conservación del número de leptones así como la simetría inversa del tiempo de la paridad de carga (charge-parity-time: CPT). <<

[87] Para completar lo dicho, añadamos que, aunque mucho de lo que hemos cubierto hasta ahora en el texto se aplica igualmente a las cuerdas abiertas (cuerdas con los extremos sueltos) y a los bucles de las cuerdas cerradas (las cuerdas en las que nos hemos centrado), en el tema que se discute aquí resultaría que los dos tipos de cuerdas tienen propiedades diferentes. Después de todo, una cuerda abierta no se va a enmarañar por hacer bucles en torno a una dimensión circular. No obstante, en 1989, con un trabajo que decididamente ha desempeñado un papel decisivo en la segunda revolución de las supercuerdas, Joe Polchinski, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y dos de sus discípulos, Jian-Hui Dai y Robert Leigh, demostraron cómo las cuerdas abiertas encajan perfectamente en las conclusiones a las que llegamos en este capítulo. <<

[88] En el caso de que usted se esté preguntando por qué las posibles energías de vibración uniformes son múltiplos *enteros* de 1/*R*, basta con que retroceda mentalmente a la discusión sobre mecánica cuántica —concretamente el ejemplo del almacén— del capítulo 4. Allí vimos que la mecánica cuántica implica que la energía, como el dinero, se presenta en paquetes discretos: múltiplos enteros de distintas denominaciones o valores de la energía. En el caso del movimiento de vibración uniforme de las cuerdas en el universo de la manguera de riego, este valor de la energía es precisamente 1/*R*, como demostramos en el texto aplicando el principio de incertidumbre. Por lo tanto, las energías de vibración uniformes son múltiplos enteros de 1/*R*. <<

[89] Matemáticamente, la identidad entre las energías de las cuerdas en un universo dotado de una dimensión circular cuyo radio es o bien R, o $1/R$, se deriva del hecho de que las energías son de la forma $v/R + wR$, donde v es el número cuántico de vibración u oscilación, y w es el número de enrollamiento. Esta ecuación es invariable con respecto al intercambio simultáneo de v y w, así como de R y $1/R$ —es decir, con respecto al intercambio de los números cuánticos de vibración y enrollamiento, y con respecto a la inversión del radio—. En nuestra discusión trabajamos con unidades de Planck, pero también lo podemos hacer con unidades más convencionales reescribiendo la fórmula de la energía en términos de $\sqrt{\alpha'}$ —la denominada escala de las cuerdas— cuyo valor es más o menos la longitud de Planck, 10^{-33} centímetros. A continuación podemos expresar las energías de las cuerdas como $v/R + wR/\alpha'$, que es invariable con respecto al intercambio de v y w así como de R y α'/R, donde estos dos últimos valores se expresan ahora en unidades convencionales de longitud. <<

[90] Puede que usted se esté preguntando cómo es posible que una cuerda que se despliega siempre en torno a una dimensión circular de radio *R*, sin embargo nos dé una medida del radio con valor 1/*R*. Aunque ésta es una preocupación plenamente justificable, la respuesta se basa realmente en la imprecisa formulación de la propia pregunta. Cuando decimos que una cuerda se enrolla envolviendo un círculo de radio *R*, necesariamente estamos aludiendo a una definición de distancia (de tal modo que la expresión «radio *R*» tenga sentido). Pero esta definición de distancia es la que resulta importante para los modos de cuerdas no enrolladas, es decir, los modos de vibración. Desde la perspectiva de *esta* definición de distancia —y sólo de esta definición— las configuraciones de las cuerdas enrolladas se estiran rodeando la parte circular del espacio. Sin embargo, a partir de la segunda definición de distancia, la que se refiere a las configuraciones de las cuerdas enrolladas, las configuraciones están formadas por cada trozo en cuanto a que dicho trozo se encuentra localizado en el espacio, al igual que los modos de vibración lo están desde la perspectiva de la primera definición de distancia, y el radio que «ven» es 1/R, tal como se dice en el texto.
Esta descripción explica en cierto modo por qué las cuerdas enrolladas y no enrolladas miden distancias que están en relación inversa. Pero, dado que esta cuestión es bastante sutil, quizá sea conveniente, para el lector aficionado a las matemáticas, que señalemos cuál es el análisis técnico en que se basa esto. En la mecánica cuántica ordinaria de las partículas puntuales, la distancia y el ímpetu (esencialmente la energía) están relacionados mediante la transformación de Fourier. Es decir, el estado propio |x> de posición en un círculo de radio *R* se puede definir mediante $|x\rangle = \Sigma_v e^{ixp}|p\rangle$;, donde $p = v/R$ y |p> es un estado propio del ímpetu (la analogía directa de lo que hemos llamado el modo de vibración uniforme de una cuerda: movimiento global sin cambio en la forma). Sin embargo, en la teoría de cuerdas existe una segunda noción de estado propio de posición $|\tilde{x}\rangle$ que se define utilizando los estados de enrollamiento de las cuerdas: $|\tilde{x}\rangle = \Sigma_w e^{i\tilde{x}\tilde{p}}|\tilde{p}\rangle$ donde $\tilde{p}\rangle$ es un estado propio de enrollamiento, siendo $\tilde{p} = wR$ A partir de estas definiciones vemos que *x* es periódica con período $2\pi R$ mientras que $\tilde{x}$ es periódica con período $2\pi/R$, mostrando que *x* es una coordenada de posición en un círculo de radio $\tilde{R}$, mientras que $\tilde{x}$ es la coordenada de posición en un círculo de radio 1/*R*. De una manera aún más explícita, podemos suponer que tomamos los dos paquetes de ondas |x> y $\backslash\tilde{x}\rangle$, comenzando ambos, por ejemplo, en el origen, y que dejamos que evolucionen en el tiempo con el fin de aplicar nuestro método operativo para definir la distancia. El radio del círculo, según la medición de cada sondeo, es entonces

proporcional al lapso de tiempo requerido para que el paquete vuelva a su configuración inicial. Puesto que un estado con una energía E evoluciona mediante un vector de fase en el que interviene Et, vemos que el lapso de tiempo, y por lo tanto el radio, es $t \sim 1/E \sim R$ para los modos de vibración y $t \sim 1/E \sim 1/R$ para los modos de enrollamiento. <<

[91] Para el lector aficionado a las matemáticas, aclararemos que, más exactamente, el número de familias de vibraciones de cuerdas es un medio del valor absoluto del número característico de Euler del espacio de Calabi-Yau, como ya mencionamos en la nota 16 del capítulo 9. Esto viene dado por el valor absoluto de la *diferencia* entre $h^{2,1}$ y $h^{1,1}$, donde $h^{p,q}$ denota el número de Hodge *(p,q)* Salvo un cambio numérico, estos números indican la cantidad de ciclos homológicos, tridimensionales y no triviales («agujeros tridimensionales») y el número de ciclos homológicos bidimensionales («agujeros bidimensionales»). Y así, mientras en el texto principal hablamos del número total de agujeros, un análisis más preciso demuestra que el número de familias depende del valor absoluto de la diferencia entre los agujeros de dimensión par y los de dimensión impar. La conclusión, no obstante, es la misma. Por ejemplo, si dos espacios de Calabi-Yau difieren por el intercambio de sus respectivos $h^{2,1}$ y $h^{1,1}$ números de Hodge, el número de familias de partículas —y el número total de «agujeros»— no cambiará. <<

[92] El nombre procede del hecho de que los «diamantes de Hodge» —un resumen matemático de los agujeros de distintas dimensiones en un espacio de Calabi-Yau— son reflejo especular unos de otros para cada espacio de Calabi-Yau formado por un par de espejos. <<

[93] El término *simetría especular* se utiliza también en otros contextos completamente diferentes dentro de la física, tales como la cuestión de la chiralidad —es decir, si el universo tiene simetría izquierda-derecha— como se explicó en la nota 7 del capítulo 8. <<

[94] El lector aficionado a las matemáticas se dará cuenta de que estamos preguntando si la topología del espacio es dinámica, es decir, si puede cambiar. Aunque, a menudo, podemos utilizar el lenguaje del cambio de topología dinámico, en la práctica nos referimos generalmente a una familia de *espacios-tiempos* cuya topología cambia en función del parámetro. En términos técnicos, este parámetro no es el tiempo, pero dentro de ciertos límites puede identificarse esencialmente con el tiempo. <<

[95] Para el lector aficionado a las matemáticas, diremos que este procedimiento incluye la supresión de las curvas racionales de una variedad de Calabi-Yau y el posterior uso del hecho de que, en determinadas circunstancias, la singularidad resultante se puede reparar mediante pequeñas resoluciones diferentes. <<

[96] K. C. Cole, *New York Times Magazine*, 18 de Octubre de 1987, p. 20. <<

[97] Albert Einstein, según se cita en John D. Barrow, *Theories of Everything* (New York: Fawcett-Columbine, 1992), p. 13. <<

[98] Resumamos brevemente las diferencias entre las cinco teorías de cuerdas. Para ello, hemos de tener en cuenta que las perturbaciones vibratorias pueden recorrer un bucle de cuerda en el sentido de las agujas del reloj, o en el sentido contrario. Las teorías de cuerdas del Tipo IIA y del Tipo IIB difieren en que en la última teoría, estas vibraciones en el sentido de las agujas del reloj y en el contrario son idénticas, mientras que en la primera son opuestas en cuanto a la forma.
Opuestas tiene un significado matemático preciso en este contexto, pero lo más fácil es pensar en ella en los términos de los espines de los patrones vibratorios resultantes en cada teoría. En la teoría del Tipo IIB, resulta que todas las partículas giran en el mismo sentido (tienen todas la misma chiralidad), mientras que en la teoría del Tipo IIA giran en ambos sentidos (tienen ambas chiralidades). Sin embargo cada teoría posee supersimetría. Las dos teorías heteróticas difieren de un modo similar, pero más drástico. Cada una de sus vibraciones de cuerdas en el sentido de las agujas del reloj tiene el mismo aspecto que las de la teoría de cuerdas del Tipo II (cuando nos centramos exclusivamente en las vibraciones realizadas en el sentido de las agujas del reloj, las teorías del Tipo IIA y del Tipo IIB son la misma teoría), pero las vibraciones correspondientes en el sentido opuesto al de las agujas del reloj son las de la teoría bosónica de cuerdas original. Aunque las cuerdas bosónicas plantean problemas irresolubles cuando se eligen tanto para las vibraciones de cuerdas en el sentido de las agujas del reloj, como para las otras, en 1985 David Gross, Jeffrey Harvey, Emit Martinez y Ryan Rohm (todos trabajaban entonces en la Universidad de Princeton y doblaban al «Princeton String Quartet») demostraron que surge una teoría perfectamente coherente, si se usa en combinación con la teoría de cuerdas del Tipo II. La auténtica característica extraña es que desde que se publicó el trabajo de Claude Lovelace de la *Rutgers University* en 1971 y el de Richard Brower de la Universidad de Boston, Peter Goddard de la Universidad de Cambridge y Charles Thorn de la Universidad de Florida en Gainesville en 1972, se ha sabido que la cuerda bosónica requiere un espacio-tiempo de 26 dimensiones, mientras que la supercuerda, como ya hemos explicado, requiere uno de 10 dimensiones. Por lo tanto, las construcciones de cuerdas heteróticas son un extraño híbrido —una *heterosis*— donde, curiosamente, los patrones vibratorios en el sentido contrario a las agujas del reloj viven en 26 dimensiones y los modelos en el sentido de las agujas del reloj viven en 10 dimensiones. Antes de que el lector se haga un lío intentando comprender esta sorprendente unión, ha de saber que Gross y sus colaboradores demostraron que las 16 dimensiones adicionales de la parte bosónica deben arrollarse en una de las dos formas muy especiales, de dimensión superior y parecidas a una rosquilla, que dan lugar a las teorías Heterótica-O y Heterótica-E. Dado que estas 16 dimensiones

adicionales de la parte bosónica están rígidamente arrolladas, cada una de estas teorías se comporta como si en realidad tuviera 10 dimensiones, justamente como en el caso del tipo II. Una vez más, ambas teorías heteróticas incluyen una versión de la supersimetría. Finalmente, la teoría del Tipo I es pariente cercana de la teoría de cuerdas del Tipo IIB, salvo que, además de los bucles cerrados de cuerdas que hemos mencionado en capítulos anteriores, tiene también cuerdas cuyos extremos no están conectados, es decir, las llamadas *cuerdas abiertas*. <<

[99] Cuando hablamos en este capítulo de respuestas «exactas», tales como el movimiento «exacto» de la Tierra, lo que esto significa realmente es la predicción exacta de alguna cantidad física *dentro de cierto marco teórico previamente elegido* Hasta que tengamos verdaderamente la teoría final —quizá la tengamos ahora, quizá no la tengamos jamás— todas nuestras teorías serán en sí mismas aproximaciones de la realidad. Pero este concepto de aproximación no tiene nada que ver con lo que discutimos en este capítulo. Aquí lo que nos preocupa es el hecho de que, dentro de una teoría determinada, a menudo es difícil, si no imposible, obtener las predicciones exactas que hace la teoría. En vez de esto, hemos de obtener esas predicciones utilizando métodos de aproximación basados en un planteamiento perturbativo. <<

[100] Estos diagramas son versiones de los llamados diagramas de Feynman llevados a la teoría de cuerdas. Richard Feynman inventó estos diagramas para realizar cálculos perturbativos dentro de la teoría de campos cuánticos de partículas puntuales. <<

[101] Más exactamente, todo par de cuerdas virtuales, es decir, todo bucle dentro de un diagrama dado, contribuye —entre otros términos más complicados— con un factor multiplicativo a la constante de acoplamiento de cuerdas. La existencia de más bucles implica más factores en el cálculo de la constante de acoplamiento de cuerdas. Si la constante de acoplamiento de cuerdas es menor que 1, las multiplicaciones reiteradas hacen que la contribución global sea cada vez menor; si la constante es igual o mayor que 1, las multiplicaciones reiteradas producen una contribución de la misma magnitud o mayor. <<

[102] Para el lector aficionado a las matemáticas, precisaremos que la ecuación afirma que el espacio-tiempo debe admitir una métrica de Ricci plana. Si dividimos el espacio-tiempo en un producto cartesiano de un espacio-tiempo de Minkowski y un espacio compacto de Kahler de seis dimensiones, el carácter plano de Ricci es equivalente a que este último espacio sea una variedad de Calabi-Yau. Ésta es la razón por la que los espacios de Calabi-Yau desempeñan un papel tan prominente en la teoría de cuerdas. <<

[103] Desde luego, no hay absolutamente nada que asegure que estos métodos indirectos estén justificados. Por ejemplo, del mismo modo que algunos rostros no poseen simetría izquierda-derecha, *podría* ser que las leyes de la física fueran diferentes en otras regiones remotas del universo, como explicaremos brevemente en el capítulo 14. <<

[104] El lector experto se dará cuenta de que estos planteamientos requieren la llamada supersimetría N=2. <<

[105] Para ser un poco más precisos, si llamamos g_{HO} a la constante de acoplamiento en la teoría Heterótica-O, y g_I a la constante de acoplamiento de la teoría del Tipo I, entonces la relación entre las dos teorías confirma que son físicamente idénticas siempre que se cumpla $g_{HO} = 1/g_I$ que es equivalente a $g_I = 1/g_{HO}$. Cuando una constante de acoplamiento es grande, la otra es pequeña. <<

[106] Se trata de una analogía muy cercana a la dualidad entre R y $1/R$ que hemos explicado anteriormente. Si llamamos g_{IIB} a la constante de acoplamiento de cuerdas de la teoría del Tipo IIB, entonces lo cierto es que los valores g_{IIB} y $1/\mathrm{g}_{\mathrm{IIB}}$ describen la misma física. Si g_{IIB} es grande, $1/\mathrm{g}_{\mathrm{IIB}}$ es pequeña, y viceversa. <<

[107] Si todas las dimensiones excepto cuatro de ellas están arrolladas, una teoría con un total de más de once dimensiones origina necesariamente partículas sin masa con un espín mayor que 2, algo que prohíben tanto las consideraciones teóricas, como las experimentales. <<

[108] Una excepción notable es el importante trabajo de 1987 realizado por Duff, Paul Howe, Takeo Inami, y Kelly Stelle en el que incluyeron anteriores concepciones de Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin, y Townsend para afirmar que la teoría de cuerdas en diez dimensiones debe tener una profunda conexión con las once dimensiones. <<

[109] Más exactamente, este diagrama se debe interpretar diciendo que tenemos una única teoría que depende de un cierto número de parámetros. Entre los parámetros se incluyen constantes de acoplamiento, así como parámetros geométricos para el tamaño y la forma. En principio, tendríamos que ser capaces de utilizar la teoría con el fin de calcular valores concretos de todos esos parámetros —un valor concreto para su constante de acoplamiento y una forma concreta para la geometría del espacio-tiempo— pero con nuestros conocimientos teóricos actuales no sabemos cómo llevar a cabo esta tarea. Y así, para comprender mejor la teoría los especialistas en teoría de cuerdas estudian sus propiedades cuando los valores de esos parámetros varían recorriendo todos los valores posibles. Si se eligen los valores de los parámetros de tal forma que estén en alguna de las seis regiones peninsulares de la Figura 12.11, la teoría tendrá las propiedades inherentes a una de las cinco teorías de cuerdas, o a la supergravedad en once dimensiones, como ya se ha indicado. Si los valores de los parámetros se eligen de tal forma que estén en la región central, la física estará gobernada por la aún misteriosa Teoría-M. <<

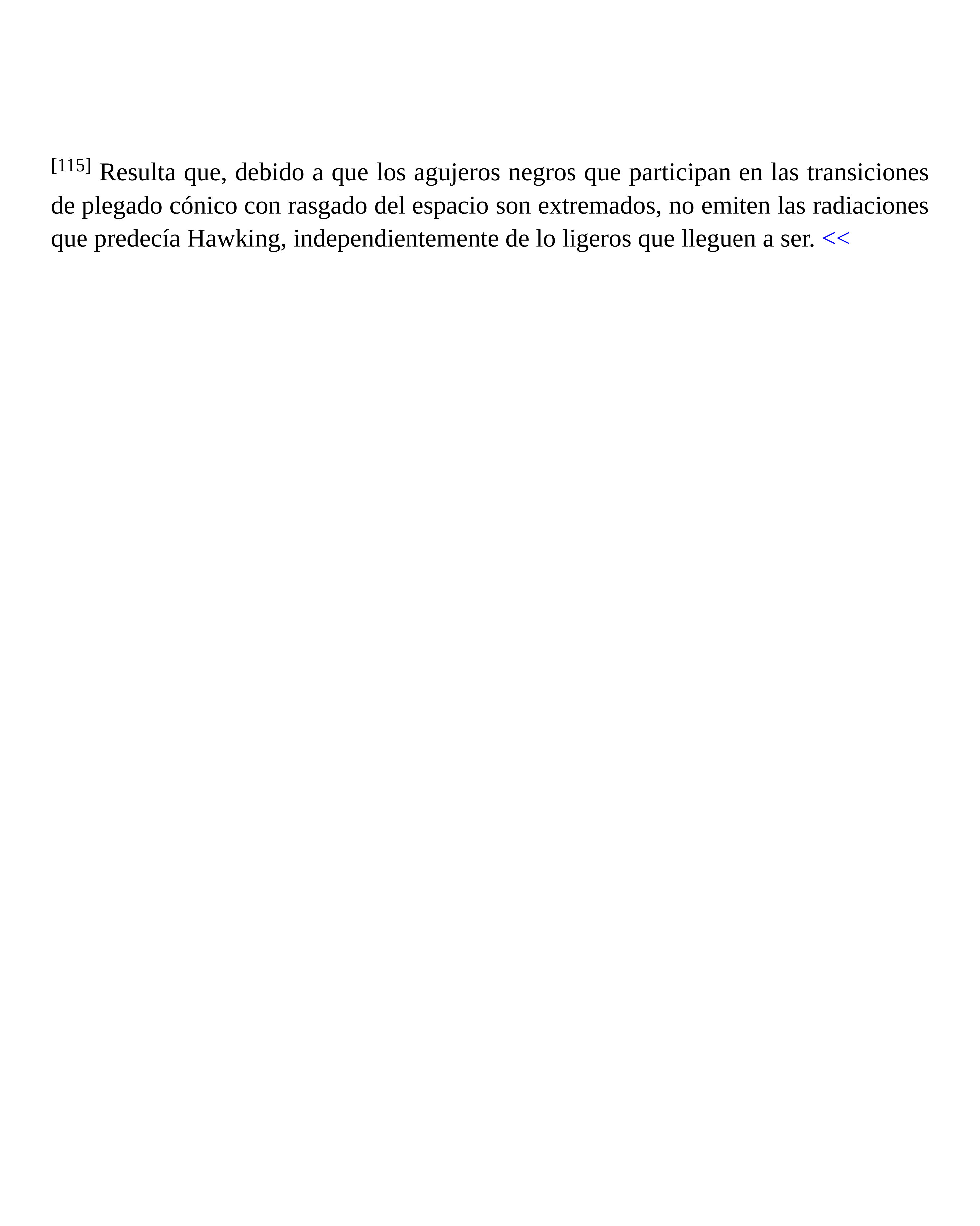
[110] Sin embargo, hemos de poner de manifiesto que, incluso en las regiones peninsulares, existen algunos métodos exóticos en los que las branas pueden producir algún efecto sobre la física que conoce nuestra intuición. Por ejemplo, se ha sugerido que nuestras tres dimensiones espaciales extendidas podrían ser *ellas mismas* una tribrana extensa y desplegada. Si es así, cuando nos movemos en nuestras actividades diarias, estaríamos deslizándonos por el interior de una membrana tridimensional. Actualmente se está emprendiendo la investigación de estas posibilidades. <<

[111] Entrevista con Edward Witten, 11 de mayo de 1998. <<

[112] El lector experto se dará cuenta de que, cuando se somete a una simetría especular, una esfera tridimensional que se esté colapsando en un espacio de Calabi-Yau se dibuja como una esfera bidimensional que se está colapsando en el espacio espejo de Calabi-Yau —llevándonos aparentemente a la situación de las transiciones blandas que comentamos en el capítulo 11—. Sin embargo, la diferencia es que una remodelación especular de este tipo da como resultado que se desvanezca el campo de tensores antisimétricos B^„ —la parte real de la forma complejizada de Káhler en el espacio espejo de Calabi-Yau— y éste es un tipo de singularidad mucho más drástica que la que hemos comentado en el capítulo 11. <<

[113] Más precisamente, éstos son ejemplos de agujeros negros *extremados*: agujeros negros que tienen la masa mínima que es coherente con las cargas de fuerza que transportan, igual que los estados BPS del capítulo 12. Unos agujeros negros similares desempeñarán también un papel decisivo en la discusión sobre la entropía de los agujeros negros que veremos más adelante. <<

[114] La radiación emitida por un agujero negro debe ser exactamente igual que la que emite un horno caliente —el mismo problema, mencionado al final del capítulo 4, que desempeñó un papel tan decisivo en el desarrollo de la mecánica cuántica—. <<



[115] Resulta que, debido a que los agujeros negros que participan en las transiciones de plegado cónico con rasgado del espacio son extremados, no emiten las radiaciones que predecía Hawking, independientemente de lo ligeros que lleguen a ser. <<



[116] Stephen Hawking, conferencia durante el Simposio de Amsterdam sobre gravedad, agujeros negros y cuerdas, 21 de junio de 1997. <<

[117] En su cálculo inicial, Strominger y Vafa descubrieron que los cálculos matemáticos se volvían más fáciles trabajando con cinco —no cuatro— dimensiones extendidas del espacio-tiempo. Sorprendentemente, después de terminar su cálculo de la entropía de uno de estos agujeros negros de cinco dimensiones, constataron que ningún teórico había elaborado hasta entonces aquellos hipotéticos agujeros negros extremados en el marco de la relatividad general en cinco dimensiones. Dado que sólo podían confirmar sus resultados comparando su respuesta con el área del horizonte de sucesos de uno de aquellos hipotéticos agujeros negros, Strominger y Vafa se pusieron a construir matemáticamente un agujero negro de cinco dimensiones. Lo consiguieron. Entonces fue sencillo demostrar que el cálculo microscópico de la entropía, realizado según la teoría de cuerdas, coincidía con lo que Hawking habría predicho basándose en el área del horizonte de sucesos del agujero negro. Sin embargo, es interesante constatar que, debido a que la solución del agujero negro se halló más tarde, Strominger y Vafa no sabían cuál era la respuesta que estaban buscando mientras realizaban sus cálculos de la entropía. Desde que se realizó este trabajo, muchos físicos, dirigidos principalmente por el físico de Princeton Curtis Callan, habían logrado extender los cálculos de la entropía al marco más familiar de las cuatro dimensiones extendidas del espacio— tiempo, y todos están de acuerdo con las predicciones de Hawking. <<

[118] Entrevista con Sheldon Glashow, 29 de diciembre de 1997. <<

[119] Laplace, *Philosophical Essay on Probabilities*, traductor. Andrew I. Dale (New York: Springer-Verlag, 1995). <<



[120] Stephen Hawking, en Hawking y Roger Penrose, *The Nature of Space and Time* (Princeton: Princeton University Press, 1995), p. 41. <<



[121] Stephen Hawking, conferencia durante el Simposio de Amsterdam sobre gravedad, agujeros negros y cuerdas, 21 de junio de 1997. <<

[122] Entrevista con Andrew Strominger, 29 de diciembre de 1997. <<

[123] Entrevista con Cumrun Vafa, 12 de enero de 1998. <<



[124] Stephen Hawking, conferencia durante el Simposio de Amsterdam sobre gravedad, agujeros negros y cuerdas, 21 de junio de 1997. <<

[125] Este tema tiene también alguna relación con la cuestión de la pérdida de información, ya que algunos físicos han especulado durante años con la posibilidad de que pudiera haber una «pepita» central incrustada en las profundidades del agujero negro donde se almacenaría toda la información aportada por la materia que queda atrapada dentro del horizonte del agujero negro. <<

[126] De hecho, las transiciones de plegado cónico con rasgado del espacio que se han comentado en este capítulo incluyen a los agujeros negros, por lo que podría parecer que estuvieran vinculadas con la cuestión de sus singularidades. Pero debemos reconocer que el rasgado asociado con el plegado cónico se produce justo cuando el agujero negro se ha despojado de toda su masa, por lo que, como consecuencia, dicho rasgado no está directamente relacionado con cuestiones concernientes a las singularidades de los agujeros negros. <<

[127] Más precisamente, el universo debería estar lleno de fotones correspondientes a la radiación emitida térmicamente por un cuerpo perfectamente absorbente —un «cuerpo negro» en la jerga de la termodinámica— que tiene la gama de temperaturas mencionada. Se trata del mismo espectro de radiación emitida mecánico-cuánticamente por los agujeros negros, como explicó Hawking, y por un horno caliente, según explicó Planck. <<

[128] Esta discusión expresa el espíritu de los temas relacionados, aunque estamos ignorando algunas características sutiles relacionadas con el movimiento de la luz en un universo en expansión que afecta a ciertas magnitudes concretas. En particular, aunque la relatividad especial afirma que nada puede desplazarse a una velocidad mayor que la de la luz, esto no impide a dos fotones que se desplazan por la estructura espacial en expansión que se alejen el uno del otro con una velocidad que supere a la de la luz. Por ejemplo, en la época en que el universo se volvió transparente por primera vez, alrededor de 300.000 años ATB, unas posiciones en el espacio que estuvieran a unos 900.000 años luz de distancia habrían podido ejercer influencia la una sobre la otra, incluso a pesar de que la distancia entre ellas superara los 300.000 años luz. El tres, como factor añadido, se deriva de la expansión de la estructura espacial. Esto significa que, cuando pasamos la película cósmica hacia atrás en el tiempo, al llegar a los 300.000 años ATB, dos puntos del espacio sólo tienen que estar a menos de 900.000 años luz de distancia para haber tenido la posibilidad de influirse el uno al otro en cuanto a la temperatura. Estos valores concretos no cambian las características cualitativas de los temas que hemos comentado. <<

[129] Para una discusión detallada y en vivo sobre el descubrimiento del modelo cosmológico del hinchamiento y de los problemas que éste resuelve, véase Alan Guth, *The Inflationary Universe* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1997). <<

[130] Para el lector interesado por las matemáticas, explicaremos cuál es la idea que subyace a esta conclusión: si la suma de las dimensiones del espacio-tiempo de las trayectorias recorridas por cada uno de los dos objetos es mayor o igual que la dimensión del espacio-tiempo de la región a través de la cual se desplazan, entonces las trayectorias generalmente se cortarán. Por ejemplo, si unas partículas puntuales recorren trayectorias unidimensionales en el espacio-tiempo, entonces la suma de las dimensiones en el espacio-tiempo de dos de las trayectorias de estas partículas es dos. La dimensión de Línealandia en el espacio-tiempo es también dos, por lo tanto sus trayectorias en general llegarán a cortarse (suponiendo que sus velocidades no se hayan ajustado con precisión para que sean exactamente iguales). De manera similar, las cuerdas recorren trayectorias bidimensionales en el espacio-tiempo (las láminas universales correspondientes); para dos cuerdas la suma en cuestión es por consiguiente cuatro. Esto significa que las cuerdas que se mueven en cuatro dimensiones en el espacio-tiempo (tres dimensiones espaciales y una temporal) generalmente llegarán a cortarse. <<

[131] Con el descubrimiento de la Teoría-M y el reconocimiento de una undécima dimensión, los especialistas en teoría de cuerdas han comenzado a estudiar distintas maneras de hacer que las *siete* dimensiones adicionales se conviertan en dimensiones arrolladas, de tal modo que todas ellas queden más o menos en pie de igualdad. Las opciones posibles para estas variedades de siete dimensiones se conocen con el nombre de variedades *Joyce*, en honor de Domenic Joyce de la Universidad de Oxford, al que se reconoce el hallazgo de las primeras técnicas para la construcción matemática de dichas variedades. <<

[132] Entrevista con Cumrun Vafa, 12 de enero de 1998. <<

[133] El lector experto observará que nuestra descripción se desarrolla en el llamado marco de referencia de las cuerdas, en el que la creciente curvatura durante el pre big bang surge a partir de un aumento (inducido por el dilatón) de la intensidad de la fuerza de la gravedad. En el llamado marco de Einstein, esta evolución se describiría como una fase de contracción acelerada. <<

[134] Entrevista con Gabriele Veneziano, 19 de mayo de 1998. <<



[135] Las ideas de Smolin se explican en su libro *The Life of the Cosmos* (Oxford University Press, Nueva York, 1997). <<

[136] Dentro de la teoría de cuerdas, por ejemplo, esta evolución podría estar impulsada por pequeños cambios en la forma de las dimensiones arrolladas, partiendo así de un universo y llegando hasta su progenie. A partir de nuestros resultados relativos a las transiciones de plegado cónico con rasgado del espacio, sabemos que una sucesión suficientemente larga de esos pequeños cambios puede llevamos de un espacio de Calabi-Yau a otro, permitiendo al multiverso reunir muestras de la eficiencia reproductora de todos los universos basados en las cuerdas. Después de que el multiverso ha pasado a través de una cantidad suficiente de fases de reproducción, la hipótesis de Smolin nos induciría a esperar que el universo típico tuviera una componente de Calabi-Yau que estaría optimizada para la fertilidad. <<

[137] Entrevista con Edward Witten, 4 de Marzo de 1998. <<

[138] Algunos teóricos ven un indicio de esta idea en el *principio holográfico*, un concepto inventado por Susskind y el renombrado físico holandés Gerard't Hooft. Del mismo modo que un holograma puede reproducir una imagen visual tridimensional a partir de una película bidimensional especialmente diseñada, Susskind y Gerard't Hooft han sugerido que todos los acontecimientos con los que nos encontramos pueden en realidad codificarse completamente mediante unas ecuaciones definidas en un universo de dimensión *inferior*. Aunque esto pueda sonar tan extraño como intentar hacer el retrato de alguien viendo sólo su sombra, podemos hacemos una idea de lo que quieren decir, y entender en parte la motivación de Susskind y Gerard't Hooft, pensando en la entropía de los agujeros negros tal como se explicó en el capítulo 13. Recordemos que la entropía de un agujero negro está determinada por el área de la superficie de su horizonte de sucesos, y *no* por el volumen total del espacio que delimita el horizonte de sucesos. Por lo tanto, el desorden que hay en un agujero negro, y en correspondencia con esto la información que puede contener, están codificados en los datos bidimensionales de su superficie. Es casi como si el horizonte de sucesos del agujero negro actuara como un holograma capturando toda la información contenida en el interior tridimensional del agujero negro. Susskind y Gerard't Hooft han generalizado esta idea a la totalidad del universo, sugiriendo que todo lo que ocurre en el «interior» de éste es meramente un reflejo de los datos y las ecuaciones definidas en una distante superficie que lo delimita. Recientemente, un trabajo realizado por el físico de Harvard Juan Maldacena, junto con el importante trabajo posterior de Witten y de los físicos de Princeton Steven Gubser, Igor Klebanov y Alexander Polyakov, ha demostrado que, al menos en ciertos casos, *la teoría de cuerdas incluye el principio holográfico*. De una manera que actualmente está siendo investigada vigorosamente, resulta que las propiedades físicas de un universo gobernado por la teoría de cuerdas tiene una descripción equivalente que abarca sólo las propiedades físicas que se dan en esa superficie delimitadora; una superficie que necesariamente tiene una dimensión inferior a la del interior. Algunos especialistas en teoría de cuerdas han sugerido que la total comprensión del principio holográfico y su rol dentro de la teoría de cuerdas puede muy probablemente llevarnos a la tercera revolución de las supercuerdas. <<

[139] *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, traductor Motte y Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), Vol. 1, p. 6. <<

[140] Si está usted familiarizado con el álgebra lineal, un modo sencillo e importante de pensar la geometría no conmutativa es sustituir las coordenadas cartesianas convencionales, que son conmutativas con respecto a la multiplicación, por matrices, que no son conmutativas con respecto a dicha operación. <<

[141] Entrevista con Cumrun Vafa. 12 de enero de 1998. <<

[142] Entrevista con Edward Witten. 11 de mayo de 1998. <<



[143] Citado en Banesh Hoffman con Helen Dukas, *Albert Einstein, Creator and Rebel* (New York: Viking, 1972), p. 18. <<

[144] Martin J. Klein, “Einstein: The Life and Times, by R. W. Clark”, (book review) *Science* 174, pp.1315-16. <<

[145] Jacob Bronkowski, *The Ascent of Man* (Boston: Little, Brown, 1973), p. 20. <<